

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Rok Prodan

**Modeliranje in simulacija toplotnih
izgub stavbe**

DIPLOMSKO DELO
NA UNIVERZITETNEM ŠTUDIJU

MENTOR: prof. dr. Nikolaj Zimic

Ljubljana, 2014

Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavljanje ali izkoriščanje rezultatov diplomskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

Diplomsko delo je oblikovano z urejevalnikom besedil \LaTeX .

Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Tematika naloge:

Ogrevanje in hlajenje predstavlja velik strošek pri uporabi stavb. Stroške lahko zmanjšujemo z boljšo izolacijo stavb, rekuperacijo energije itd. Prihranimo lahko tudi z uporabo učinkovitih postopkov za upravljanje gretja in hlajenja stavbe.

V diplomski nalogi izdelajte toplotni model enostavne stavbe. Na modelu preizkusite različne načine upravljanja sistemov gretja in hlajenja. Ovrednotite tudi vpliv upoštevanja vremenskih napovedi na upravljanje stavbe.

Za pripravo modela in simulacij uporabite programsko okolje Matlab in Simulink.

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Spodaj podpisani Rok Prodan, z vpisno številko **63080126**, sem avtor diplomskega dela z naslovom:

Modeliranje in simulacija toplotnih izgub stavbe

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom prof. dr. Nikolaja Zimica,
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela,
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki "Dela FRI".

V Ljubljani, dne 24. septembra 2014

Podpis avtorja:

ZAHVALA

Motivacijo in navdih za diplomsko delo sem pridobil med obiskom Inovacijsko-razvojnega inštituta (IRI), Univerze v Ljubljani, ki ga v tem primeru predstavljata prof. dr. Slavko Dolinšek in mag. Jure Vetršek.

Za pomoč in podporo pri interdisciplinarnem delu se zahvaljujem mentorju prof. dr. Nikolaju Zimicu. Na tem mestu bi se rad zahvalil tudi doc. dr. Urošu Stritihu, iz Laboratorija za ogrevalno, sanitarno in solarno tehniko ter klimatizacijo, Fakultete za Strojništvo, za marsikatero koristno informacijo, nasvet in branje diplomskega dela. Enaka zahvala gre tudi že prej omenjenemu mag. Juretu Vetršku.

Posebna zahvala za neomajano podporo v času nastajanja dela pripada Karin Favento. Za podporo skozi vsa leta dodiplomskega študija se zahvaljujem svoji družini Samu, Bojani in Ani, brez katerih izdelava tega dela in dokončanje študija ne bi bilo mogoče.

Na koncu bi se rad zahvalil še vsem tistim, ki so kakorkoli sodelovali pri nastajanju tega dela in na tem mestu niso omenjeni.

— Rok Prodan, Ljubljana, september 2014.

Svojemu tatu, mami in sestri.

Kazalo

Povzetek

Abstract

1	Uvod	1
2	Poraba energije v stavbah	3
2.1	Energetska učinkovitost stavb	5
2.2	Povečevanje energetske učinkovitosti	7
3	Vpliv vremena na porabo energije	9
3.1	Pretekli in trenutni meteorološki podatki	9
3.1.1	Uporaba informacij javnega značaja	10
3.2	Modelska napoved	11
3.3	Tipično meteorološko leto	11
4	Toplotni model stavbe	13
4.1	Prenos toplote	13
4.1.1	Prevod toplote	14
4.1.2	Prestop toplote	16
4.1.3	Sevanje toplote	17
4.2	Toplotna upornost	17
4.2.1	Serijska vezava toplotnih uporov	18
4.2.2	Paralelna vezava toplotnih uporov	19
4.3	Toplotne izgube in dobitki	20

5	Modeliranje in simulacija v programu MATLAB/Simulink	23
5.1	Fizikalni model stavbe	25
5.1.1	Poenostavitve	25
5.1.2	Dimenzijske lastnosti stavbe	26
5.1.3	Toplotne lastnosti ovoja stavbe	26
5.2	Toplotno vezje modela stavbe	27
5.2.1	Povečevanje reprezentativnosti modela	29
5.3	MATLAB	30
5.4	Simulink	30
6	Rezultati	37
6.1	Toplotni odziv stavbe	37
6.2	Simulacija v zimskem letnem času	41
6.2.1	Energijsko neučinkovito ogrevanje stavbe	41
6.2.2	Upoštevanje obratovalnega časa stavbe	43
6.2.3	Dnevni in nočni režim ogrevanja	44
6.2.4	Upoštevanje vremenske napovedi	45
6.3	Simulacija v poletnem letnem času	47
6.3.1	Običajno hlajenje stavbe	47
6.3.2	Hlajenje z nočnim prezračevanjem	48
6.4	Poraba energije	49
7	Diskusija in zaključek	51
A	Seznam parametrov	59
B	Analogija električnih in termodinamičnih veličin	61
C	Izvorna koda	63

Povzetek

Energetsko učinkovita poraba energije v stavbah za potrebe ogrevanja, ohlajevanja ter prezračevanja bo v prihodnje zaradi želje po energetski neodvisnosti in nuje po zmanšanju s tem povezanih stroškov predstavljala eno od glavnih raziskovalnih področij. Iskanje množice rešitev, ki bi pripeljale do optimalne porabe energije na realnem primeru stavbe, je dolgotrajen, zahteven, predvsem pa drag postopek. Za premagovanje tega problema je v tem diplomskem delu predstavljen in razvit poenostavljen toplotni model stavbe. Ta je bistven pri napovedovanju potreb po ogrevanju ali hlajenju, za spremljanje porabe energije ter razvoju in analizi raznih načinov ogrevanja in hlajenja. V nadaljevanju so bile izvedene simulacije različnih načinov ogrevanja in hlajenja na implementiranem matematičnem modelu stavbe. Na koncu so bili predstavljeni rezultati simulacij obdobja enega tedna iz testnega referenčnega leta v zimskem in poletnem času.

Ključne besede: energetska učinkovitost, toplotni model stavbe, centralno nadzorni sistem, HVAC sistemi, optimizacija, simulacija, testno referenčno leto

Abstract

Energy efficient use in buildings for heating, cooling and ventilation purposes is going to represent one of the main research areas in incoming years. Mainly because of the desire for energy independence as well as necessity for costs reduction. Seeking for a set of solutions which would lead to optimal energy consumption on real building case is time consuming, complex and especially cost ineffective process. To overcome this problem a simplified building thermal model is presented and developed in this thesis. This model is essential in predicting heating and cooling requirements for performance monitoring as well as for heating and cooling methods development and analysis. Several different heating and cooling methods were then simulated on the implemented mathematical building model. Finally simulation results for a time frame of one week in winter and summer seasons from a test reference year were presented.

Keywords: energy efficiency, building thermal model, building management system, HVAC systems, optimization, simulation, test reference year

Poglavje 1

Uvod

Hitro narašujoča svetovna poraba energije je že pred časom zbudila pomisleke o težavah glede zanesljivosti oskrbe in izčrpanosti naravnih energetske virov v prihodnosti. K temu lahko dodamo še gromozanske negativne vplive na okolico, kot so npr. onesnaževanje, podnebne spremembe itd., ki so posledica čedalje večjih potreb po energiji.

Poraba energije na svetu se je v zadnjih letih v stavbnem sektorju nenehno povečevala. Naraščanje populacije in povpraševanja po gradbenih storitvah, dvig ravni udobja ter povečan delež časa, ki ga preživimo v stavbah, zagotavljajo, da se bo poraba energije v stavbah povečevala tudi v prihodnjem obdobju.

Zaradi zgoraj omejenih dejstev bo v prihodnosti definitivno potrebno zagotoviti večjo energetske učinkovitost v stavbnem sektorju. Le na ta način bomo na dolgi rok lahko dosegli vzdržnost in sožitje z naravo.

Obstaja več možnosti in poti za doseganje večje energetske učinkovitosti pri porabi energije v stavbah. V grobem jih lahko razdelimo na tri:

1. izboljšanje toplotnih lastnosti ovoja stavbe, npr. z dodatno izolacijo,
2. zamenjava obstoječih sistemov za ogrevanje, hlajenje, prezračevanje, razsvetljavo itd., z novejšimi, bolj energijsko učinkovitimi,
3. racionalno in pametnejše upravljanje s sistemi iz točke 2.

Prva in druga točka predstavljata zelo dragi investiciji, poleg tega pa sta v domeni gradbenikov, arhitektov in strojnikov. Za računalnikarje je zanimiva tretja točka.

Pri vseh današnjih večjih novogradnjah je običajno poleg že vgrajen t. i. centralno nadzorni sistem - CNS (angl. *building management system* - BMS). Preko CNS lahko nadziramo in upravljamo z vsemi podsistemi kot so sistemi za ogrevanje, hlajenje in prezračevanje (angl. *Heating, Ventilation and Air Conditioning systems*), razsvetljavo itd. v stavbi. Iz stališča povečevanja energetske učinkovitosti postane tako razvijanje in merjenje učinkovitosti različnih kontrolnih strategij ogrevanja in hlajenja zelo zanimivo. Računalnikar lahko kontrolne strategije ogrevanja, hlajenja itd. implementira in realizira preko CNS.

Narava dinamičnega sistema stavbe je taka, da bi za odgovor o morebitnih prihrankih kot posledico spremenjenega načina ogrevanja, hlajenja itd. potrebovali zelo veliko časa. V izogib tej nevšečnosti se v te namene izdelava podroben matematični model stavbe, [12] nad katerim se kasneje izvaja simulacije. Z rezultati simulaciji si lahko nato pomagamo pri iskanju smiselnih rešitev za optimiranje porabe energije v stavbi.

Diplomsko raziskavo lahko v grobem razdelimo na tri smiselne dele. V prvem delu so predstavljeni statistični podatki o deležu porabljene energije v stavbnem sektorju. Podan je tudi opis vremenskih vplivov na energetsko porabo. Poleg tega so navedene še relevantne meteorološke spremenljivke, katerih vrednosti je za posamezno vremensko napoved mogoče pridobiti iz svetovnega spleta.

V drugem delu smo se pretežno ukvarjali z modeliranjem dinamičnega sistema stavbe. Razloženi so osnovni načini prenosa toplote, ki so ključni pri modeliranju stavbe. Obširna razlaga je podkrepljena s slikami in matematičnimi enačbami.

V zadnjem delu smo predstavili implementacijo matematičnega modela stavbe v programskem paketu MATLAB/Simulink. Zraven so vključeni še rezultati simulacij in komentarji.

Poglavje 2

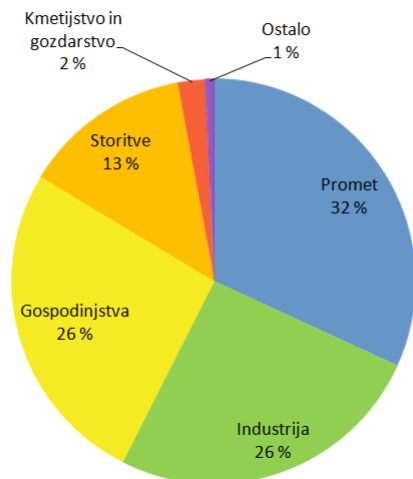
Poraba energije v stavbah

Energetsko učinkovito upravljanje sistemov v stavbah bo v prihodnje igralo glavno vlogo pri minimiziranju skupne porabe energije in stroškov.

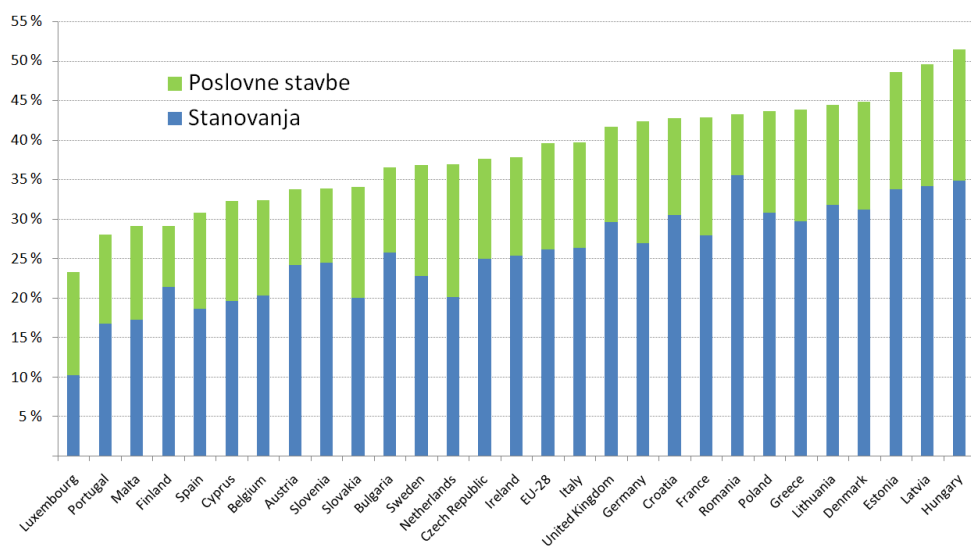
Gospodinjiski in storitveni sektor v Evropi uporabita 437 Mtoe (milijon ton ekvivalentne nafte) energije [17], kar znaša okoli 39 % vse končne energije, potrošene v Evropi. Slika 2.1 prikazuje deleže celotne končne energije za posamezen sektor. Opazno največji delež potrošene energije pripada stavbnemu sektorju, sestavljenemu iz gospodinjanskega in storitvenega sektorja. Storitveni oziroma nestanovanjski sektor pokriva poslovne in javne stavbe kot so vrtci, šole, restavracije, hoteli, bolnišnice, muzeji itd., gospodinjiski pa stanovanja. Stavbnemu sektorju sledita promet z 32 % ter industrija z 26 %. Najmanjši, 2 % delež sodi v kmetijsko-gozdarski sektor.

Slovenija se po podatkih Evropskega statističnega urada Eurostat uvršča v spodnjo tretjino držav z najmanjšim deležem porabljene končne energije v stavbnem sektorju. Slednji je v letu 2012 v Sloveniji potrošil nekaj manj kot 35 % vse proizvedene končne energije. Luksemburg, Portugalska, Malta in Finska so edine države v EU, ki se ponašajo z deležem potrošene energije, manjšim od 30 %.

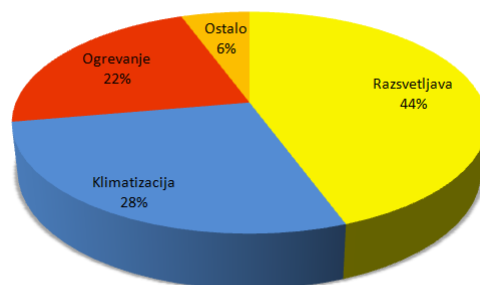
Stolpci na sliki 2.2 predstavljajo deleže potrošene končne energije v stavbnem sektorju posamezne članice Evropske Unije. Modri del stolpca zavzemajo stanovanja, medtem ko zeleni del stolpca pripada poslovnim stavbam.



Slika 2.1: Poraba končne energije v EU-28 glede na sektor v letu 2012. Vir: [17].



Slika 2.2: Skupna poraba energije stanovanjskih in poslovnih stavb posamezne članice EU, 2012. Vir: [17].



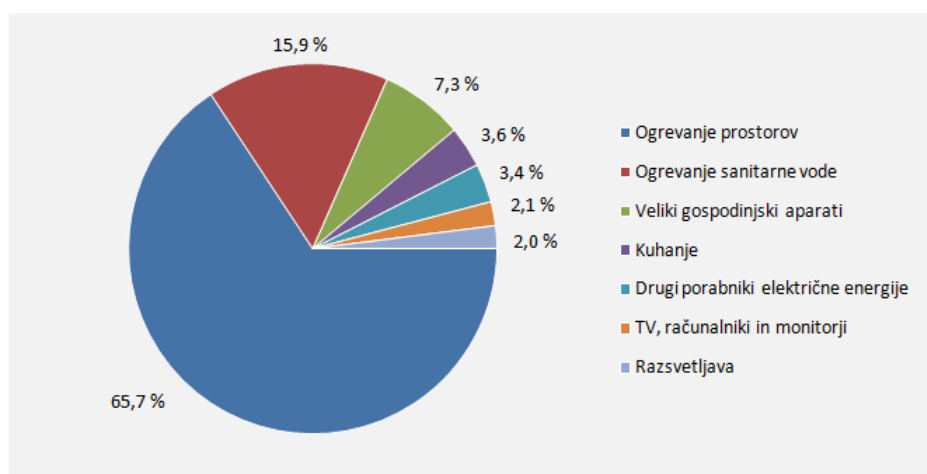
Slika 2.3: Deleži porabljene energije v poslovnih stavbah glede na namen. Vir: [20].

Tortni diagram na sliki 2.3 ponazarja potrošeno energijo v poslovnih stavbah glede na namen. Ta se v glavnem deli med tri večje porabnike: razsvetljavo z 44 %, klimatizacijo z 28 % in ogrevanje z 22 % deležem. Vidimo, da ogrevanje v zimskem skupaj s klimatizacijo v poletnem času zavzemata 50 % delež.

Razmerja pri stanovanjih se precej bolj razlikujejo. Levji delež, 65,7 %, v tem primeru odpade za namen ogrevanja prostorov, kar je lepo vidno na sliki 2.4. Za namen ogrevanja sanitarne vode in napajanja velikih gospodinjskih aparatov se potroši občutno manjši delež, in sicer 15,9 % oziroma 7,3 %. Najmanjši deleži pripadajo kuhanju, elektronskim napravam (TV, računalniki in monitorji) ter razsvetljavi.

2.1 Energetska učinkovitost stavb

Energetska učinkovitost stavbe pomeni koliko energije v stavbi porabimo za zagotavljanje ugodja stanovalcev. Ugodje zagotavljamo z zadovoljevanjem potreb po energiji povezanih z običajno uporabo stavbe. Sem spadajo v glavnem energija za ogrevanje, prezračevanje, hlajenje, toplo vodo, razsvetljavo in naprave.



Slika 2.4: Končna poraba energije po namenih, stanovanja, Slovenija, 2009.
Vir: SURS.

Po direktivi 2012/27/EU Evropskega parlamenta in Sveta z dne 25. oktobra 2012 o energetske učinkovitosti [16] morajo države članice na nacionalni ali regionalni ravni sprejeti metodologijo za izračunavanje energetske učinkovitosti.

Pri tem so obvezane upoštevati naslednje vidike:

- toplotne značilnosti stavbe (toplotna zmogljivost, izolacija itd.),
- ogrevalne sisteme in oskrbo s toplo vodo,
- klimatske naprave,
- vgrajeno razsvetljavo,
- notranje klimatske pogoje.

Pri izračunu se lahko upošteva tudi vpliv drugih vidikov, kot so lokalna izpostavljenost soncu, naravna osvetlitev, električna energija proizvedena v soproizvodnji, skupni ogrevalni in hladilni sistemi.

Metodologija za izračunavanje energetske učinkovitosti stavb je opredeljena v direktivi Evropske Unije za energetske učinkovitost stavb, EPBD

(angl. *Energy Performance of Buildings Directive*). EPBD je direktiva, ki predstavlja ključni del zakonodaje o zagotavljanju zmanjševanja porabe energije v stavbah. S strani Evropske Unije je bila prvič objavljena v letu 2002. Na tem mestu velja omeniti še Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah (PURES), ki predstavlja implementacijo EPBD direktive v slovenski pravni red.

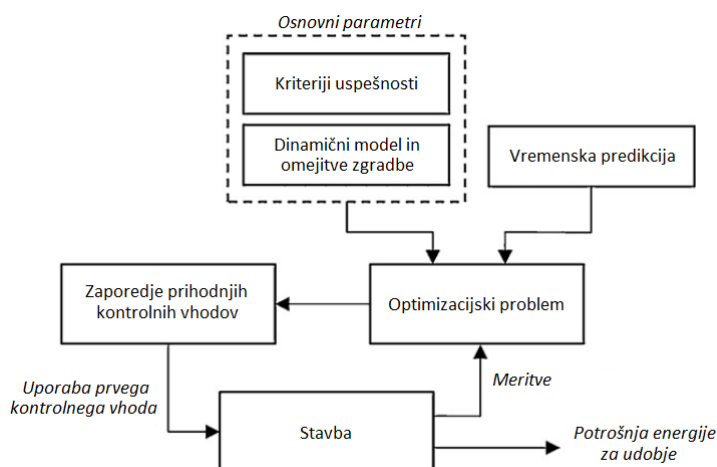
2.2 Povečevanje energetske učinkovitosti

Optimizacija porabe energije v stavbnem sektorju ni pomembna le z vidika zmanjševanja potrebnih stroškov za ta namen ampak tudi zaradi dolgoročnega zmanjševanja lokalnega onesnaževanja zaradi kurjenja goriv in emisij toplogrednih plinov, ki ob tem nastajajo kot stranski produkt.

Povečevanje energetske učinkovitosti obstoječih HVAC sistemov (angl. *Heating, Ventilation and Air Conditioning systems*) je v prvi vrsti nujno zaradi dolge življenjske dobe stavb. To mora biti storjeno na način, da zmanjševanje porabe energije in stroškov uporabe HVAC sistemov ne bo negativno vplivalo na spremembo nivoja ugodja bivanja (toplotno udobje, primerna kakovost zraka, osvetlitve in hrupa) v stavbi.

Obetavno raziskavo v zvezi z upravljanjem HVAC sistemov so opravili F. Oldewurtel in ostali [8]. V članku je predstavljena napredna tehnika imenovana MPC (angl. *Model Predictive Control*). Uporablja se jo v stavbah z IRA (angl. *Integrated Room Automation*) za doseganje večje učinkovitosti. Avtorji se osredotočajo predvsem na razvoj in analizo stohastične MPC strategije, ki upošteva negotovost vremenske napovedi.

MPC je enostaven in intuitiven pristop k omejenem nadzoru v stavbah. Shema MPC za nadzor ugodja in porabe energije v stavbi je prikazana na sliki 2.5. Vhode optimizacijskega problema tvorijo osnovni parametri, napovedi in meritve. Osnovni parametri definirajo dinamiko, omejitve stavbe in kriterije za optimizacijo. Napovedi so v osnovi vremenske, vendar pa se lahko vključi tudi druge vrste napovedi kot sta npr. urnik zasedenosti prostorov



Slika 2.5: Shema MPC za nadzor udobja in porabe energije v stavbi. Vir: [8]

ali razpon toplotnega udobja. Meritve predstavljajo trenutno stanje HVAC sistemov.

Jedro MPC predstavlja optimizacijski problem. Ta se formulira in reši v vsakem intervalu vzorčenja za vnaprej definiran časovni okvir npr. nekaj ur, lahko tudi dni. Rezultat optimizacijskega problema je kontrolni plan tj. zaporedje naslednjih vhodnih parametrov za optimalno upravljanje HVAC sistemov.

Podobno analizo MPC za energetske učinkovito ogrevanje stavbe in študijo primera so opravili tudi J. Široký in ostali [11].

Poglavje 3

Vpliv vremena na porabo energije

Podnebje je glavni zunanji dejavnik, ki poleg profila uporabe in namena vpliva na načrtovanje strukture stavbe in izbiro njenih toplotnih lastnosti. Stavbe nam poleg udobnega bivanjskega prostora hkrati nudijo tudi zaščito pred nezaželenimi zunanjimi vplivi vremena, kot so padavine, neustrezna temperatura in veter.

Poznavanje meteoroloških podatkov na območju stavbe je pomembno pri izračunavanju potrebne energije za udobno bivanje. To nam omogoča, da svoje upravljanje z HVAC sistemi v celoti prilagodimo trenutnim in napovedanim vremenskim razmeram. Na ta način je mogoče doseči večjo energetske učinkovitost stavbe.

Javno dostopne meteorološke podatke je moč pridobiti preko vremenskega portala [14] Agencije Republike Slovenije za Okolje - ARSO.

3.1 Pretekli in trenutni meteorološki podatki

ARSO zagotavlja pretekle meteorološke podatke za določena območja v Sloveniji iz arhiva [15] opazovanih in merjenih meteoroloških spremenljivk.

Na spletnem arhivu lahko dostopamo do podatkov merjenih od datuma 01.01.1961 dalje. Navigator arhiva služi kot uporabniški vmesnik in omogoča različne vrste poizvedb glede na izbrani tip podatkov, tip postaje ter časovni

okvir. Meteorološki podatki, ki so uporabniku na voljo, se med seboj zelo razlikujejo glede na izbrani tip podatkov in postaje. Obdobje v katerem je bila izbrana postaja postavljena in konfiguracija njene senzorike sta glavna razloga za nepopolnost nekaterih podatkov.

Prve avtomatske ali tudi samodejne vrste meteoroloških postaj so bile nameščene na manjšem številu lokacij po vzhodni Sloveniji po letu 1990. Večina ostalih današnjih postaj jim je sledila okoli leta 1998.

Tip meteorološke spremenljivke [enota]	Najmanjša	Največja	Povprečna	Terminska
Zračni tlak [hPa]	✓	✓	✓	-
Temperatura zraka na višini 2 m [°C]	✓	✓	✓	✓
Relativna vlaga [%]	✓	✓	✓	✓
Količina padavin [mm]	-	-	-	✓
Hitrost vetra [m/s]	✓	-	✓	-
Smer vetra [°]	-	-	✓	-
Energijski tok globalnega sevanja [W/m ²]	-	-	✓	-
Energijski tok difuznega sevanja [W/m ²]	-	-	✓	-

Tabela 3.1: Meteorološke spremenljivke za samodejni tip postaje.

V tabeli 3.1 so prikazane razpoložljive vrednosti za posamezen tip meteorološke spremenljivke na samodejnem tipu postaje. Za vse tipe meteoroloških spremenljivk z izjemo količine padavin je na razpolago njihova povprečna vrednost. Nekatere omogočajo še dodatne poizvedbe o najmanjši, največji in terminski vrednosti. Terminska vrednost določene meteorološke spremenljivke pomeni, da se vrednost te spremenljivke vzorči ob točno določeni uri dneva (običajno ob 07:00, 14:00 in 21:00).

3.1.1 Uporaba informacij javnega značaja

Vse informacije, objavljene na spletnih straneh ARSO, so javne in na voljo za ponovno uporabo skladno z Uredbo o posredovanju in ponovni uporabi informacij javnega značaja [22]. V 26. členu navedene uredbe je zapisano, da organ vedno kot pogoj za ponovno uporabo informacij javnega značaja v

pridobitne ali nepridobitne namene določi navedbo vira podatkov, ki obsega naziv »Javne informacije Slovenije« in naziv organa. Pri ponovni uporabi javno dostopnih podatkov se je nato obvezno pravilno sklicevati na njihov vir.

3.2 Modelska napoved

ARSO objavlja redne večdnevne modelske napovedi za posamezna območja v Sloveniji, ki se posodablajo vsaj dvakrat dnevno.

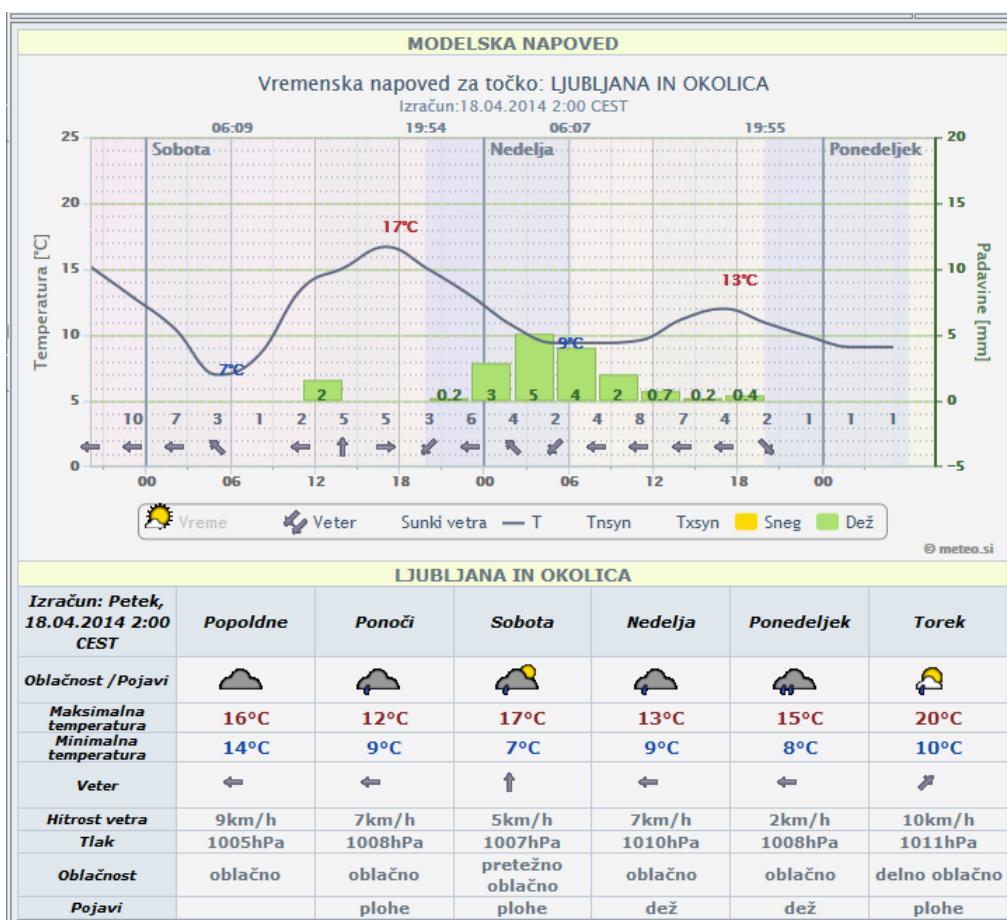
Slika 3.1 predstavlja primer 5-dnevne modelske napovedi za Ljubljano in njeno okolico na dan 18.04.2014. Na grafu je prikazan predviden potek temperature, maksimalna in minimalna temperatura, količina padavin in smer vetra. Podobno so v razpredelnici podatki o tlaku, hitrosti vetra in ostalih meteoroloških spremenljivkah.

Kljub privlačni vizualizaciji napovedi na sliki 3.1 pa ni bilo nikjer zaslediti možnosti izvoza podakov o vremenski napovedi za potrebe nadaljnje obdelave. Zaradi tega razloga se je za potrebe simulacij uporabilo tipično meteorološko leto.

3.3 Tipično meteorološko leto

Tipično meteorološko leto ali tudi testno referenčno leto sestavljajo meseci, izbrani iz različnih let dolgoročnega podatkovnega niza merjenih meteoroloških spremenljivk.

Določanje ustreznih mesecev za sestavo testnega referenčnega leta poteka po naslednjem postopku. Za vsakega od dvanajstih mesecev se iz dolgoročnega podatkovnega niza določi nekaj kandidatov iz različnih let. Izbrani so na podlagi razdalje med komulativno distribucijsko funkcijo (KDF) posameznega meseca in KDF dolgoročnega povprečja, za ustrezno meteorološko spremenljivko. Mera razdalje med dvema funkcijama je definirana z Finkelstein-Schaferjevo (FS) statistiko [3]. Meseci z najnižjimi vrednostmi



Slika 3.1: 5-dnevna modelska napoved za Ljubljano in njeno okolico. Vir: ARSO.

FS predstavljajo množico kandidatov pri izbiri najprimernejšega meseca za sestavo referenčnega leta.

Obstaja več sorodnih metod za generiranje testnega referenčnega leta. Če bralca o tem več zanima, naj nadaljuje z branjem v [2, 10].

Poglavje 4

Toplotni model stavbe

Razumevanje toplotnega odziva stavbe je ključnega pomena pri razvoju toplotnega modela in strategij za ogrevanje in hlajenje prostorov v stavbah. Toplotni odziv ali obnašanje stavbe je besedna zveza z zelo širokim pomenom. V tem primeru smo se z njo omejili predvsem na pojave, ki so povezani s prenosom toplote iz okolice v notranjost stavbe in obratno.

S prenosom ali tudi prehodom toplote skozi gradbene konstrukcije se ukvarja posebna veja fizike, ki se imenuje gradbena fizika.

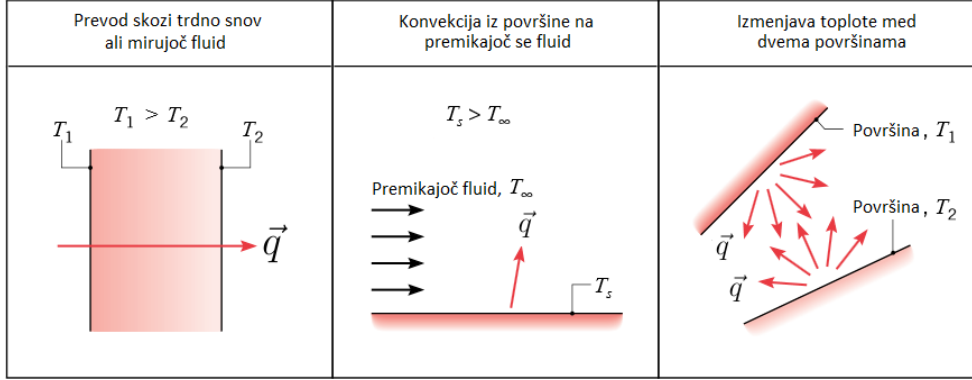
4.1 Prenos toplote

Prenos toplote (angl. *heat transfer*) je toplotna energija (angl. *thermal energy*) v prehajanju zaradi temperaturne razlike v prostoru. Prenos toplote se zgodi vedno, ko v nekem mediju ali med mediji obstaja razlika v temperaturi.

Temperatura je indikacija toplotne energije shranjene v snovi. S pojmom temperature lahko identificiramo toplo in hladno. Ničti zakon termodinamike pravi, da sta dve telesi v termodinamičnem ravnovesju in med njima ne prehaja toplotna energija, če imata enako temperaturo.

Toplotna energija Q prehaja samodejno iz teles z višjo temperaturo na telesa z nižjo temperaturo. Prenaša se s toplotnim tokom \dot{Q} (angl. *heat transfer*

rate). Toplotni tok je fizikalna količina, ki nam pove koliko toplotne energije se v časovni enoti prenese med dvema telesoma z različnima temperaturama.



Slika 4.1: Prevod, prestop in sevanje - trije mehanizmi prenosa toplote.
Vir: [5].

Na sliki 4.1 so prikazani tri osnovni mehanizmi prenosa toplote in sicer:

1. prevod toplote ali kondukcija,
2. prestop toplote ali konvekcija,
3. sevanje ali radiacija.

4.1.1 Prevod toplote

Prevod toplote imenujemo pojav, pri katerem atomi v trdnih snoveh ali v tekočini (fluidu) z višjo toplotno energijo predajajo energijo sosednjim z nižjo toplotno energijo.

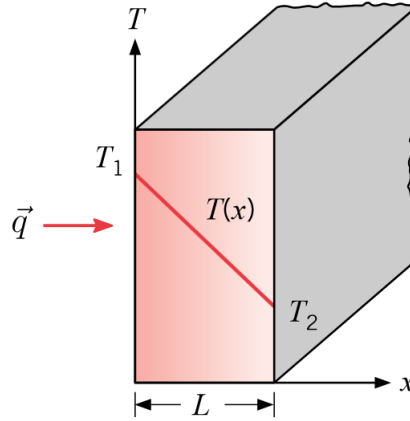
Toplotno prevodnost opisuje *Fourierjev zakon*. Na primeru prereza zidu iz slike 4.2, s temperaturno porazdelitvijo $T(x)$, prevod toplote izrazimo kot

$$\vec{q} = -k \nabla T = -k \frac{dT}{dx} \quad (4.1)$$

Enačba 4.1 predstavlja diferencialno obliko *Fourierjevega zakona*, kjer je \vec{q} gostota toplotnega toka (angl. *heat flux*), ∇T temperaturni gradient in

k koeficient toplotne prevodnosti. Ta je empirično določen in je odvisen od vrste materiala, iz katerega je narejen zid. Ker je temperaturni gradient na sliki 4.2 v smeri osi x negativen, se na začetku enačbe 4.1 nahaja negativen predznak. Toplotni tok v tem primeru teče v smeri osi x .

Merske enote posameznih fizikalnih veličin ter njihove pripadajoče angleške izraze si lahko bralec ogleda v dodatku A.



Slika 4.2: Prevod toplote skozi zid v smeri osi x . Vir: [5].

Stanje, kadar je temperaturna porazdelitev v steni linearna, imenujemo stacionarno stanje. V tem primeru temperaturni gradient izrazimo kot,

$$\nabla T = \frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (4.2)$$

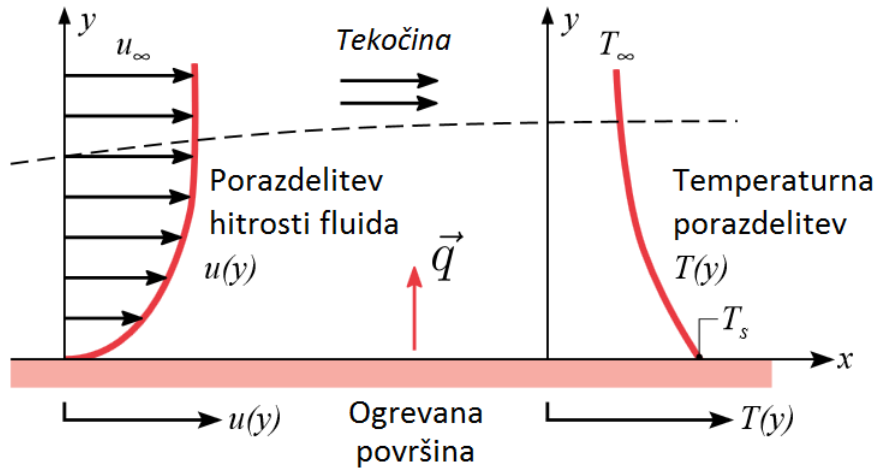
$$\vec{q} = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (4.3)$$

Enačba 4.3 podaja gostoto toplotnega toka, tj. toplotni tok prenešen skozi enoto površine. Temperaturna razlika med točkama T_1 in T_2 je izražena z ΔT , L je debelina zidu ter k koeficient toplotne prevodnosti. Če enačbo 4.3 integriramo po celotni površini stene dobimo toplotni tok \dot{Q} ,

$$\dot{Q} = \int_S k \frac{T_1 - T_2}{L} dA = kA \frac{\Delta T}{L} = \frac{\Delta T}{R_{prevoda}} \quad (4.4)$$

4.1.2 Prestop toplote

Prestop toplote se zgodi med površino in premikajočo se tekočino, kadar se temperatura slednjih razlikuje. Posledica interakcije med površino in tekočino je razvoj t. i. hidrodinamičnega območja.



Slika 4.3: Razvoj hidrodinamičnega območja pri konvekciji. Vir: [5].

Hidrodinamično območje, ki nastane pri konvekciji toplote je ponazorjeno s sliko 4.3. V tem območju se temperatura $T(y)$ in hitrost tekočine $u(y)$ spreminjata v odvisnosti od oddaljenosti površja. Če je temperatura površja T_s večja od temperature tekočine T_∞ , potem se prestop toplote zgodi iz površja na tekočino.

Gostota toplotnega toka \vec{q} pri prestopu toplote je definirana kot

$$\vec{q} = h(T_s - T_\infty) \quad (4.5)$$

Gostota toplotnega toka je proporcionalna razliki temperature površja T_s in temperature tekočine T_∞ pomnožene s koeficientom toplotne prestopnosti h . Enačbo 4.5 imenujemo tudi *Newtonov zakon ohlajanja*.

$$\dot{Q} = \int_S h(T_s - T_\infty) dA = hA\Delta T = \frac{\Delta T}{R_{prestopa}} \quad (4.6)$$

Podobno kot pri prevodu toplote lahko enačbo 4.5 integriramo po celotni površini stene in tako dobimo toplotni tok \dot{Q} pri prestopu toplote.

4.1.3 Sevanje toplote

Sevanje toplote je energija, ki jo oddaja snov pri neničelni temperaturi glede na absolutno ničlo. Ta mehanizem prenosa toplote smo pri matematičnem modelu stavbe in simulacijah zanemarili. V kolikor bralca o tem več zanima, priporočamo, da nadaljuje z branjem v [5] oziroma [4].

4.2 Toplotna upornost

Toplotna upornost je povezana s prevajanjem toplote oziroma toplotnega toka na podoben način, kot je električna upornost povezana s prevajanjem električnega toka. Fourierjev zakon v termodinamiki je analogen Ohmovemu zakonu v elektrotehnik. Poznavanje Ohmove analize na ta način bistveno olajša razumevanje toplotne upornosti računalnikarjem.

Toplotna upornost pri prevodu toplote skozi plast stene je definirana kot

$$R_{prevoda} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\dot{Q}} = \frac{L}{kA} \quad (4.7)$$

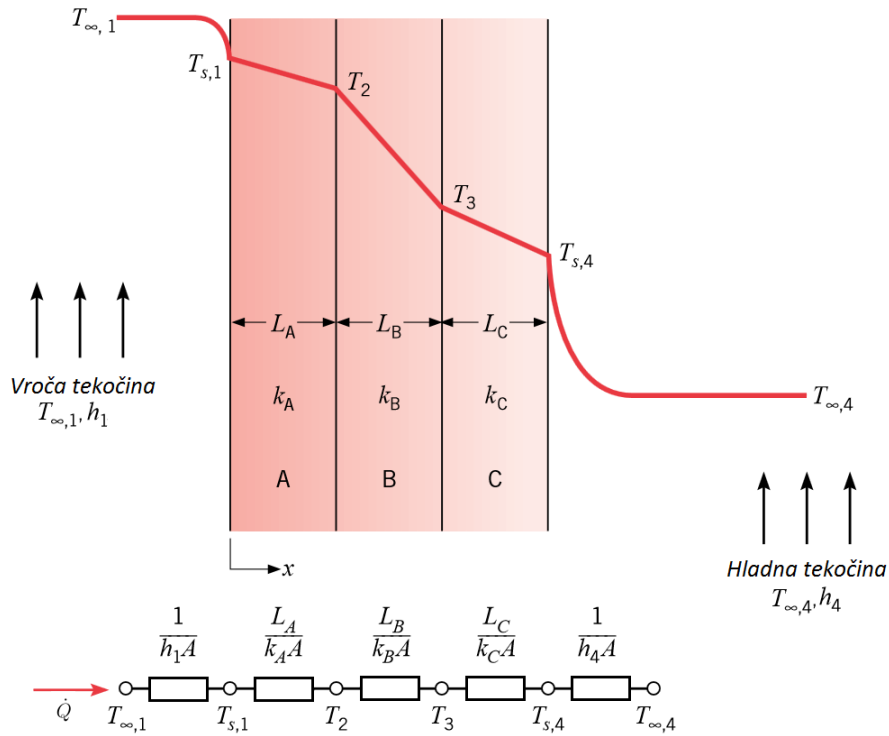
pri čemer je L debelina plasti, A površina plasti ter k koeficient toplotne prevodnosti. Toplotna upornost pri prestopu toplote iz površja na tekočino oziroma obratno pa kot

$$R_{prestopa} = \frac{T_s - T_\infty}{\dot{Q}} = \frac{1}{hA} \quad (4.8)$$

s to razliko, da je h v tem primeru koeficient toplotne prestopnosti. Enačba za toplotno upornost zaradi radiacije sledi podobnemu konceptu kot predhodnji dve enačbi, ki pa je na tem mestu zaradi že omenjene poenostavitve ne bomo omenjali. Bralec lahko podrobno razlago najde v [5].

4.2.1 Serijska vezava toplotnih uporov

Serijsko vezani toplotni upori se seštevajo na enak način kot se v elektrotehniko seštevajo električni upori. Rezultat serijske redukcije toplotnih uporov je ekvivalentna toplotna upornost R_{eq} .



Slika 4.4: Ekvivalentno toplotno vezje za skupek različnih plasti. Vir: [5].

Slika 4.4 prikazuje kompozitum plasti ovoja A , B in C . Vsaka plast ima svojo debelino L_i ter koeficient toplotne prevodnosti k_i , pri čemer je $i = \{A, B, C\}$. Na začetku osi x (na zunanji strani ovoja) se najprej zgodi prestop toplote iz tekočine na plast A . Sledi prevod toplote skozi tri med seboj različne plasti. Na koncu se ponovno zgodi prestop toplote iz površja plasti C na tekočino.

Na sliki 4.4 je narisano tudi pripadajoče ekvivalentno toplotno vezje, ki se uporablja pri opisovanju dinamike takih kompleksnih sistemov. V takem

sistemu na celotno steno gledamo kot na skupek posameznih plasti iz različnih vrst materialov s pripadajočimi koeficienti toplotnih prevodnosti.

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\sum R_t} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{R_{eq}} \quad (4.9)$$

Zgornjo enačbo lahko zapišemo tudi v razširjeni obliki

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{(1/h_1A) + (L_A/k_A A) + (L_B/k_B A) + (L_C/k_C A) + (1/h_4A)} \quad (4.10)$$

Kadar imamo take sisteme, običajno v enačbi 4.10 iz vsote razmerij v imenovalcu izpostavimo povišino stene A . Vsoto vseh razmerij nato izrazimo na bolj enostaven način, in sicer s skupnim koeficientom toplotne prehodnosti

$$U_{eq} = \frac{1}{(1/h_1) + (L_A/k_A) + (L_B/k_B) + (L_C/k_C) + (1/h_4)} \quad (4.11)$$

$$\dot{Q} = U_{eq} A \Delta T \quad (4.12)$$

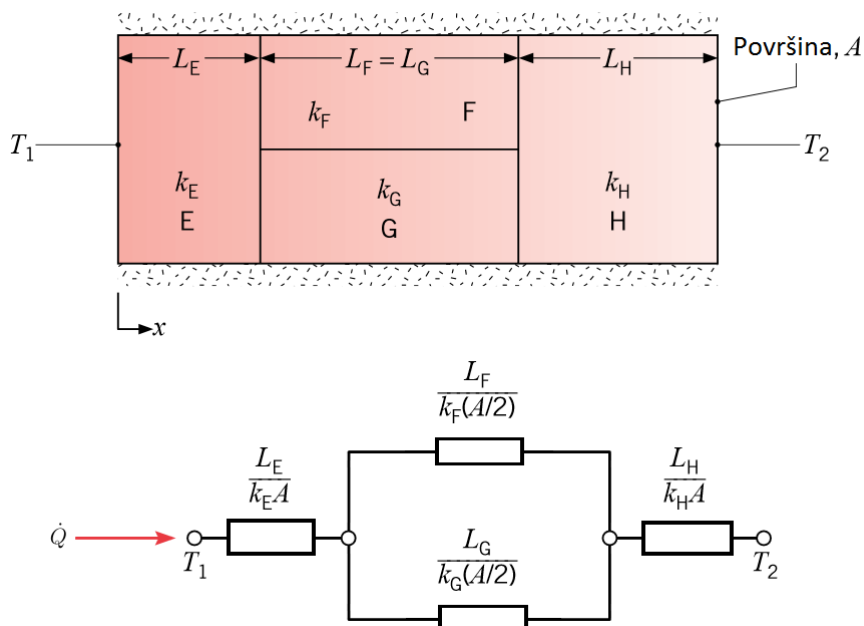
4.2.2 Paralelna vezava toplotnih uporov

Slika 4.5 predstavlja nekoliko drugačno konfiguracijo ovoja. Podobno kot v prejšnjem primeru imamo kompozitum štirih različnih plasti ovoja E, F, G in H . Vsaka plast ima širino L_i ter prevodnost k_i pri čemer je $i = \{E, F, G, H\}$.

Bistvena razlika med prejšnjim in sedanjim primerom je v tem, da sta plasti F in G med seboj paralelni. Z R_F in R_G označimo toplotni upornosti plasti F oziroma G . Nadomestno upornost dveh paralelnih plasti izračunamo na način, ki je analogen tistemu v elektrotehniki.

$$R_F || R_G = \frac{1}{\frac{1}{R_F} + \frac{1}{R_G}} = \frac{R_F * R_G}{R_F + R_G} \quad (4.13)$$

S serijsko-paralelno redukcijo lahko nato zapišemo skupno ekvivalentno upornost paralelnih in serijskih plasti, ki je potrebna za izračun toplotnega toka.



Slika 4.5: Ekvivalentno toplotno vezje za več paralelnih plasti. Vir: [5].

$$R_{eq} = \sum R_t = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} = \frac{1}{U_{eq} A} \quad (4.14)$$

Enačba 4.14 predstavlja izračun ekvivalentne toplotne upornosti, če poznamo razliko v temperaturi ΔT in toplotni tok \dot{Q} .

4.3 Toplotne izgube in dobitki

Toplotni dobitek je količina toplotne energije, ki vstopa v dan sistem (prostor). Obratno velja za toplotne izgube. Toplotne izgube in dobitki vplivajo na hitrost spreminjanja notranje temperature prostora. Toplotni dobitki se v osnovi delijo na notranje in zunanje toplotne dobitke.

Med notranje toplotne dobitke uvrščamo vire toplote, ki jih v prostoru ustvarimo ljudje, elektronske naprave in razsvetljava. V to skupino spadajo tudi toplotni dobitki v obliki transmisij in ventilacij med posameznimi pro-

stori v stavbi. Seveda se zadnji dve obliki dobitkov pojavita le v primeru razlikovanja temperature med prostori.

Zunanje dobitke predstavljajo transmisijski, ventilacijski toplotni dobitki ter toplotni dobitki zaradi sončnega sevanja skozi zastekljene površine kot tudi ostale elemente gradbene konstrukcije. Transmisijski dobitki nastanejo zaradi prehoda toplote iz zunanjega okolja skozi ovoj stavbe v notranjost. Ventilacijski dobitki lahko nastanejo iz dveh razlogov, in sicer zaradi obveznega prezračevanja prostora (mehanskega ali naravnega) ter zaradi infiltracije zraka skozi naprave ter netesnosti in vrzeli.

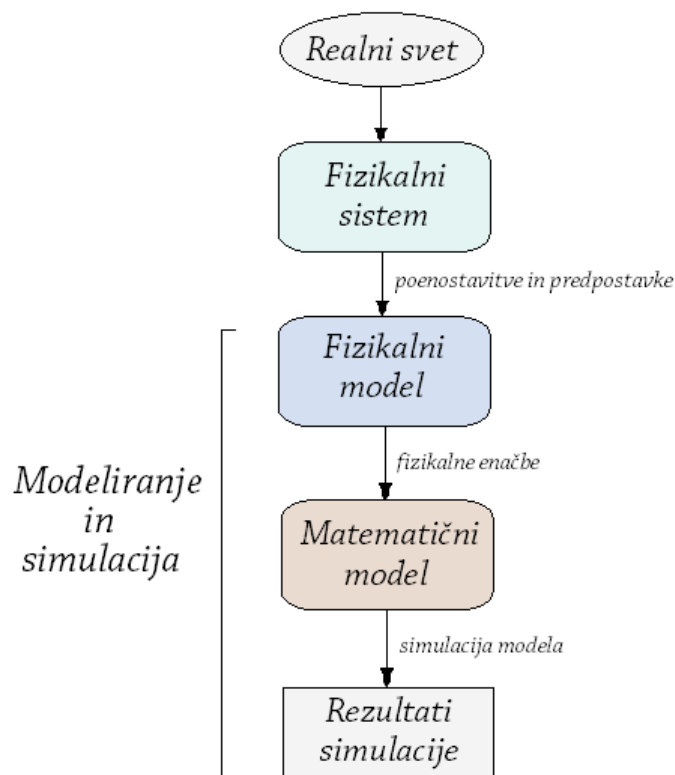
V primeru, da je temperatura okolice manjša od notranje temperature prostora, govorimo o transmisijskih in ventilacijskih izgubah. V tem primeru toplotna energija v prostoru prehaja v okolico. Podrobnejši opis in izračun vseh toplotnih dobitkov je opisan v tehnični smernici za učinkovito rabo energije [21].

Poglavje 5

Modeliranje in simulacija v programu MATLAB/Simulink

Računalniško modeliranje in simulacija je uporabna tehnika za analizo uspešnosti nekega sistema. V kolikor obravnavan sistem ni na voljo, kar v fazi načrtovanja tudi pogosto velja, računalniško modeliranje in simulacija predstavljata enostaven način za napovedovanje uspešnosti danega sistema in primerjave le-tega z nadomestnimi sistemi. Nadalje, tudi če je sistem za neposredne meritve razpoložljiv, so simulacije modelov bolj zaželeno, ker omogočajo primerjavo alternativ pod drugačnimi kontroliranimi eksperimentalnimi pogoji.

Postopek izgradnje matematičnega modela za izvedbo simulacije je prikazan na sliki 5.1. V začetnem koraku iz realnega sveta vzamemo fizikalni sistem, ki ustreza naši problemski domeni. V naslednjem koraku izdelamo fizikalni model s predefinirano stopnjo abstrakcije. Ali drugače povedano, modelu določimo kompleksnost. To storimo na način, da naredimo poenostavitve in definiramo vse predpostavke. Sledi preslikava fizikalnega v matematični model s pomočjo fizikalnih enačb. Običajno se za matematični opis dinamike nekega fizikalnega sistema uporabljajo diferencialne enačbe. Zadnji korak je izvedba simulacije, ki bi jo lahko poimenovali tudi virtualni eksperiment.



Slika 5.1: Modeliranje in simulacija.

S simulacijo dosežemo, da naš model spravimo k življenju in opazujemo njegovo obnašanje - dinamiko skozi določeno časovno okno. Simulacija predstavlja implementacijo matematičnega modela in je uporabna za potrebe testiranja, analiziranja in učenja dinamičnega sistema.

Vsekakor je na tem mestu pomembno dodati, da bodo rezultati pridobljeni z metodo neposrednega merjenja ob nadzorovanih eksperimentalnih pogojih vselej bolj natančni v primerjavi s tistimi, ki jih dobimo z računalniškim modeliranjem in simulacijo. Vendar je to pri stavbah zelo težko doseči.

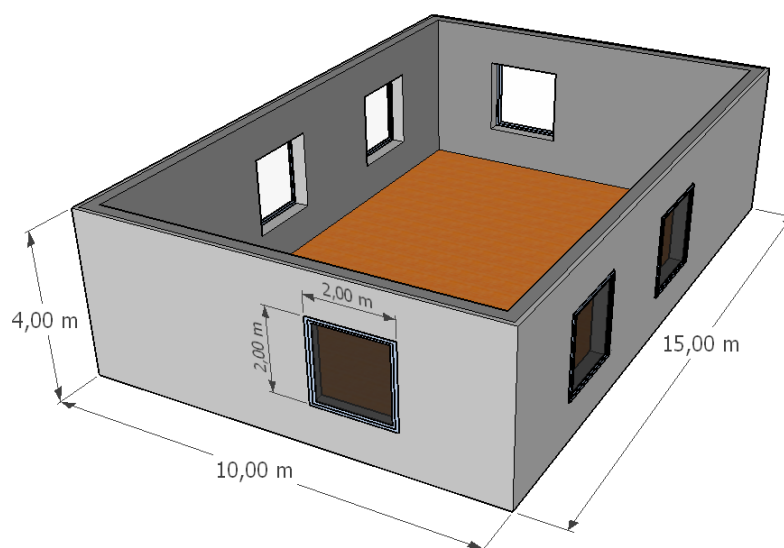
Pri vsem tem je pomembno tudi dejstvo, da lahko z modeliranjem in simuliranjem dinamičnih sistemov ceneje predvsem pa hitreje ugotovimo, če

so naše ideje in zamisli sploh izvedljive v realnem svetu.

Računalniško modeliranje in simulacija je zelo obširno področje. Za pravilno načrtovanje in implementacijo modelov zahteva veliko prebrane literature in osvojenega znanja. Bralcu za te namene priporočamo knjigo [6].

5.1 Fizikalni model stavbe

Na začetku izgradnje fizikalnega modela stavbe naredimo poenostavitve in po potrebi definiramo predpostavke. Nato določimo vse karakteristike ovojja stavbe. To pomeni, da opišemo sestavo, debelino in površino vseh elementov ovojja stavbe. Elementi ovojja so zunanje stene, stropovi, stavbno pohištvo in tla.



Slika 5.2: Simulacijski model objekta v 3-D prostoru.

5.1.1 Poenostavitve

Fizikalno modeliranje stavb je zelo kompleksna naloga. Izdelava zelo natančnega modela stavbe zahteva veliko časa in znanja iz različnih znanstvenih

področij. Iz tega razloga so bile pri izgradnji modela narejene številne poenostavitve.

V matematičnem modelu je bil recimo upoštevan le del zunanjih toplotnih izgub (dobitkov) tj. transmisijske in ventilacijske izgube. Notranje toplotne dobike smo zaradi poenostavitev modela zanemarili, prav tako kot solarne dobike. Pri prehodu toplote skozi ovoj gradbene konstrukcije sta bila upoštevna samo dva načina prenosa toplote in sicer prevod in prestop toplote. Oba načina prenosa toplote smo podrobneje razložili že v razdelkih 4.1.1 in 4.1.2. Prenos toplote s sevanjem ni bil upoštevan.

Streho in tla objekta smo obravnavali na enak način kot zunanje stene. Okna so bila modelirana kot steklene površine brez okvirjev.

5.1.2 Dimenzijske lastnosti stavbe

Predmet simulacij je model stavbe, prikazan na sliki 5.2 z dolžino 15 m, širino 10 m in višino 4 m. Streha objekta zaradi boljše vizualizacije ni prikazana.

5.1.3 Toplotne lastnosti ovoja stavbe

Okna

Okna so narejena samo iz enega stekla z debelino $L_{okna} = 0,01$ [m] in koeficientom toplotne prehodnosti $U_{okna} = 0,78$ [W/m²K]. Široka so 2 m ter visoka prav toliko. Na modelu prostora iz slike 5.2 je šest oken. Površina vseh oken tako znaša:

$$A_{okna} = 6 * 4 = 24 \text{ [m}^2\text{]}$$

Zunanje stene

Zunanje stene so sestavljene iz dveh plasti in sicer:

1. klasični opečni zidak (votlak) z lastnostmi:

- $L_{zidak} = 0,29$ [m] in

- $\lambda_{zidak} = 0,6 \text{ [W/mK]}$.

2. Mineralna volna (izolator) z lastnostmi:

- $L_{\text{mineralna volna}} = 0,10 \text{ [m]}$ in
- $\lambda_{\text{mineralna volna}} = 0,045 \text{ [W/mK]}$.

L predstavlja debelino posamezne plasti, λ pa koeficient toplotne prevodnosti. Površina vseh zunanjih sten v tem primeru znaša:

$$A_{stene} = A_{ovoja} - A_{okna} = 500 - 24 = 476 \text{ [m}^2\text{]}$$

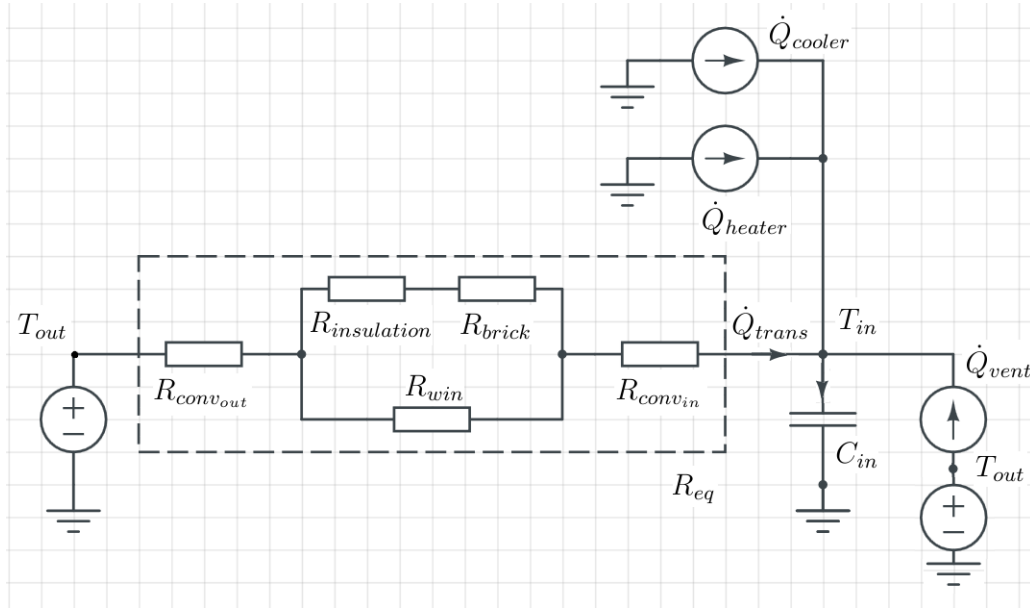
5.2 Toplotno vezje modela stavbe

Uspešno modeliranje dinamičnega sistema stavbe je pogojeno z obsegom njenih razpoložljivih fizikalnih lastnosti. Veliko takih podatkov pomeni možnost natančnejšega opisa sistema stavbe. Kot sta navedla že Wang in Xu v [13], pa je pridobivanje vseh fizikalnih lastnosti (npr. toplotne lastnosti pohištva in ostale opreme) časovno in tudi stroškovno zelo potratna naloga. Zato v takem primeru običajno predpostavimo neko srednjo vrednost.

Kljub temu je mogoče določene vrste fizikalnih podatkov pridobiti enostavneje kot druge. Lastnosti ovoja stavbe predstavljajo en tak primer. Z njimi lahko enostavno modeliramo prehajanje toplote skozi ovoj stavbe s t. i. 2C3R toplotnim modelom. Slednji je sestavljen iz dveh kondenzatorjev in treh uporov (angl. *two capacitance, three resistance thermal network*). Takšen toplotni model predstavlja ekvivalentno toplotno vezje ovoja stavbe. Pri svojih raziskavah [7] so ga uporabili O'Neill in ostali.

V podrobnosti in analizo tega modela toplotnega vezja se nismo spuščali, ker je presegal okvire tega dela. Če bralca o tem več zanima lahko svoje branje nadaljuje v [7] in [1]. V simulacijah je bil zato uporabljen poenostavljen primer, podoben tistemu, ki je opisan v razdelkih 4.2.1 in 4.2.2.

Slika 5.3 prikazuje toplotno vezje za model stavbe, ki je bil implementiran v programu MATLAB/Simulink. Potek zunanje in notranje temperature je ponazorjen s T_{out} oziroma T_{in} . V toplotnem vezju se nahajajo štirje



Slika 5.3: Toplotno vezje, ki smo ga definirali za model stavbe.

toplotni viri. Klimatska naprava je označena s \dot{Q}_{cooler} , grelec s \dot{Q}_{heater} , ventilacijski in transmissijski dobitki pa s \dot{Q}_{vent} oziroma \dot{Q}_{trans} . Ekvivalentna nadomestna upornost zidov je predstavljena z R_{eq} . Izračuna se s pomočjo serijsko-paralelne redukcije toplotnih uporov posamezne plasti zidu.

Toplotna kapacitivnost prostora C_{in} je definirana kot

$$C_{in} = (m_{air} + m_{wall}) * (cp_{air} + cp_{wall}) \quad (5.1)$$

kjer je m_{air} masa vsega zraka v prostoru, m_{wall} masa vseh zidov, cp_{air} specifična toplota zraka in cp_{wall} specifična toplota materiala iz katerega so narejeni zidovi. Pozoren bralec lahko enote, ki pripadajo določeni fizikalni veličini poišče v tabeli A.1.

Ekvivalentno toplotno vezje iz slike 5.3 za model stavbe se lahko obravnava in modelira analogno električnemu vezju. To pomeni, da se lahko toplotni tok modelira na enak način kot električni tok, temperatura je analogna napetosti itd. Računalnikarji se lahko pri razmišljanju opiramo na tabelo B.1, kjer so predstavljene termodinamične in električne analogije.

Spremembo temperature prostora po času je možno izraziti z diferencialno enačbo 5.2

$$C_{in} * \frac{dT_{in}}{dt} = \dot{Q}_{cooler} + \dot{Q}_{heater} + \dot{Q}_{trans} + \dot{Q}_{vent} \quad (5.2)$$

Sprememba notranje temperature prostora v enačbi 5.2 je odvisna od toplotnih virov in od toplotne kapacitivnosti prostora. Iz tega sledita enačbi 5.3 in 5.4

$$\dot{Q}_{eq} = \dot{Q}_{cooler} + \dot{Q}_{heater} + \dot{Q}_{trans} + \dot{Q}_{vent} \quad (5.3)$$

$$T_{in} = \frac{1}{C_{in}} \int_{\infty}^t \dot{Q}_{eq} dt \quad (5.4)$$

5.2.1 Povečevanje reprezentativnosti modela

Povečevanje reprezentativnosti toplotnega modela stavbe je mogoče na primer z dodajanjem novih virov toplote (razsvetljava, ljudje, naprave, sončno sevanje), upornosti (predelne stene) ter kapacitivnosti (zunanje stene, objekti v prostoru). Parisio, Molinari in ostali so v članku [9] k celotnim izračunom dodali še notranje toplotne dobitke označene s \dot{Q}_{int} . Avtorji članka [1], Dong, Lam in Neuman, so pri svojem modeliranju zunanjih zidov recimo upoštevali še solarne dobitke na zunanje in notranje površine.

V fizikalne podrobnosti pri modeliranju se je mogoče spuščati in zapletati v nedogled. Vprašanja, ki se raziskovalcu pri tem porajajo, so naslednja: *Do katere stopnje je še smiselno povečevati reprezentativnost modela?, Kaj in koliko pridobimo z bolj natančnim fizikalnim modelom stavbe?, Ali lahko zaradi tega pričakujemo bistveno boljše rezultate kot bi jih sicer?*

Odgovori na zgornja vprašanja niso preprosti. Dejstvo pa je, da je pri modeliranju in simulacijah vedno potrebno poiskati določen kompromis med razpoložljivim časom, znanjem in denarjem. Poleg tega za potrebe modeliranja in simulacije dinamičnega sistema stavbe že obstaja dovršena programska

oprema. Glavni programi na tem področju so npr. DesignBuilder, TRNSYS in DOE2.

5.3 MATLAB

Visokonivojski programski jezik MATLAB® je jezik četrte generacije in hkrati interaktivno okolje za numerično računanje, vizualiziranje in gradnjo matematičnih modelov. Glavna programska koda v programu MATLAB se nahaja v dodatku C.

Pred začetkom vsake simulacije se najprej izvede MATLAB skripta, ki je prikazana na C.1. Z izvedbo te skripte se inicializirajo vse dimenzijske, toplotne in ostale karakteristike modela stavbe. Poleg tega se tukaj nastavijo vse lastnosti HVAC sistemov (angl. *Heating, Ventilation and Air Conditioning systems*) ter cena električne energije na kilovatno uro porabljene energije.

Simulacijo se izvede s klicem skripte, ki je vidna na C.2. Slednja predstavlja glavno vstopno točko programa. Tukaj lahko po potrebi spreminjamo razne simulacijske parametre, kot so lokacija stavbe, letno obdobje, želena temperatura prostora, tip regulacije itd. V tej skripti se med drugim pokliče še dve pomembni funkciji. Prva prebere meteorološke podatke iz testnega referenčnega leta za izbrano simulacijsko obdobje. Prikazana je na C.3. Druga pa osveži in pripravi MATLAB-ov delovni prostor. Spremenljivke definirane v delovnem prostoru kasneje, med simulacijo, uporablja Simulink. Omenjena skripta je prikazana na C.4.

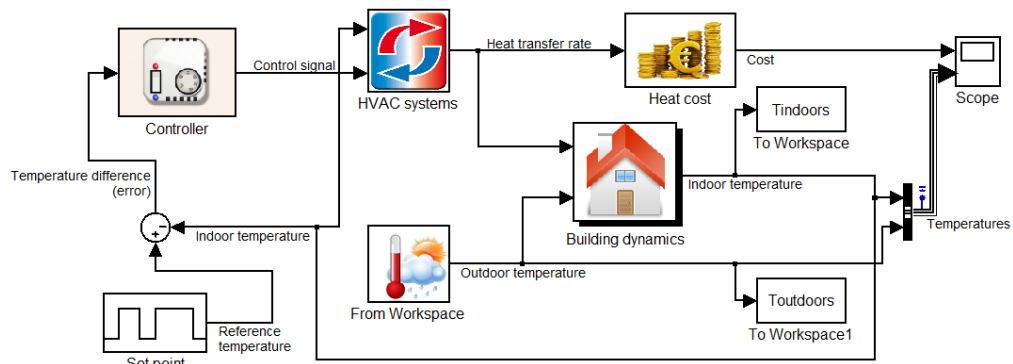
Na C.5 je še prikazana funkcija, s pomočjo katere smo izrisovali grafe.

5.4 Simulink

MATLAB-ov programski dodatek Simulink je grafično orodje za modeliranje, simuliranje in analiziranje dinamičnih sistemov. Simulink ponuja tesno integracijo z delovnim okoljem MATLAB-a. Osrednji grafični vmesnik ponuja vrsto orodij in knjižnic za gradnjo diagramov dinamičnih sistemov.

Matematični model stavbe smo zgradili na osnovi tistega, ki ga je moč dobiti na [19]. Slika 5.4 prikazuje blokovno shemo modela stavbe na najvišjem nivoju. Na tem nivoju se nahaja pet podsistemov in sicer: Set point, Controller, HVAC systems, Building dynamics in Heat cost. Simulink bere in zapisuje signale v delovni prostor MATLAB-a z gradnikoma From Workspace in To Workspace.

V podsistemu Set point se generira signal želene notranje temperature prostora. Slednji predstavlja referenčno temperaturo, ki se med izvajanjem simulacije primerja z dejansko notranjo temperaturo. Razlika referenčne in dejanske notranje temperature prostora je vhod v podsistem Controller, ki skrbi za krmiljenje HVAC sistemov.

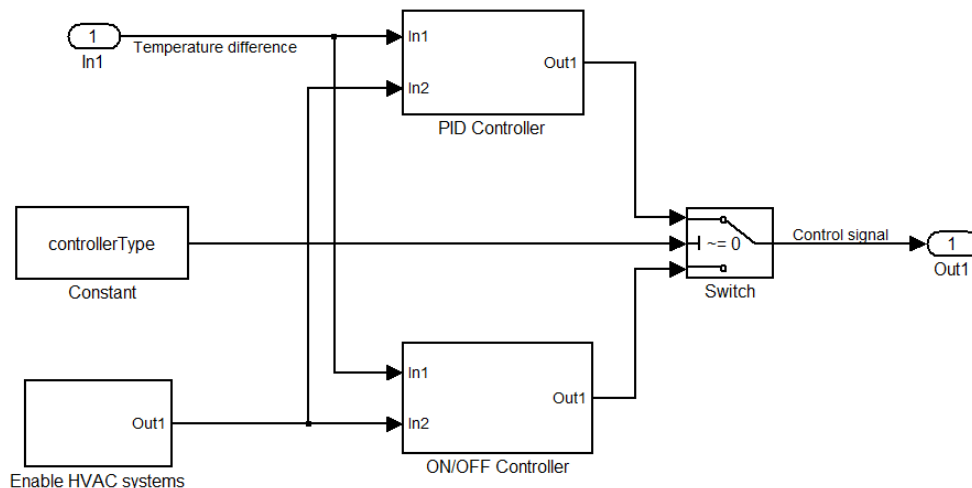


Slika 5.4: Blokovna shema modela stavbe.

V podsistemu HVAC systems se na osnovi notranje temperature prostora na vhodu In1 in kontrolnega signala na vhodu In2 ustvari toplotni tok na izhodu Out1. S pomočjo tega se prostor greje ali hladi. Ta signal je potreben tudi pri izračunu stroškov ogrevanja in hlajenja.

Dinamika stavbe se nahaja v podsistemu Building dynamics. Na vhodu In1 se nahaja toplotni tok, ki prihaja iz podsistema HVAC systems. Na vhodu In2 se nahaja zunanja temperatura. V tem podsistemu se med simulacijo izračunajo vsi toplotni dobitki in izgube. Na podlagi teh se nato

izračuna nova notranja temperatura prostora. Gradnik Scope je namenjen prikazovanju grafov.



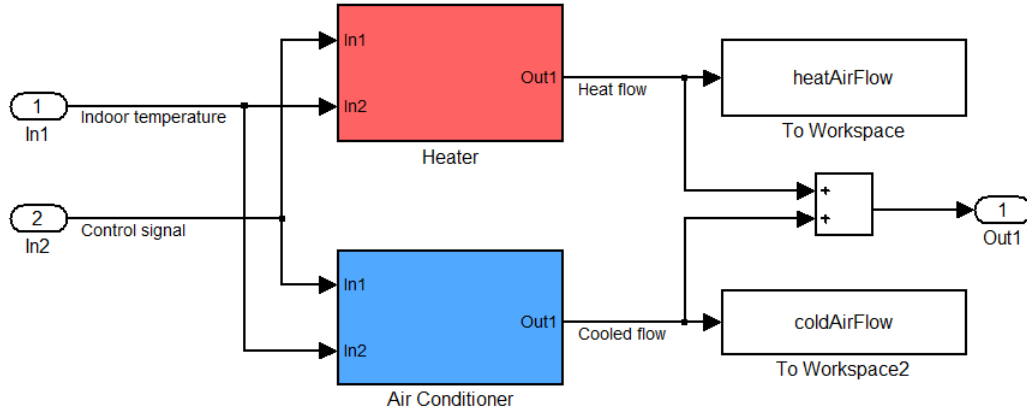
Slika 5.5: Podsistem Controller.

Na sliki 5.5 je prikazan podsistem Controller. V njem sta dva tipa krmilnikov, PID in ON/OFF. Izbiro med enim in drugim krmilnikom določa vrednost signala `controllerType`, ki se ga definira na začetku simulacije.

V podsistemu `Enable HVAC systems` se generira signal v katerem je zakodirana informacija o času obratovanja stavbe. Tudi za ta signal se na začetku določi ali bo v simulaciji upoštevan. Vse ostale vhodne simulacijske parametre se nastavi v skripti C.2, ki se nahaja v dodatku C.

Kontrolni signal na izhodu `Out1` podsistema Controller skupaj s temperaturo prostora potuje v podsistem `HVAC systems`, ki je prikazan na sliki 5.6. Na tem mestu se nahajata grelec in klimatska naprava, ki generirata topli oziroma hladni tok. Ta potuje na izhod `Out1`. Na tem izhodu se nahaja tudi seštevek moči, ki jo porabita grelec in klimatska naprava v času svojih aktivnosti.

Implementacija grelca je prikazana na sliki 5.7. Toplotni tok, ki se generira v podsistemu `Heater`, je določen z enačbo 5.5,



Slika 5.6: Sistemi za ogrevanje in hlajenje - HVAC systems.

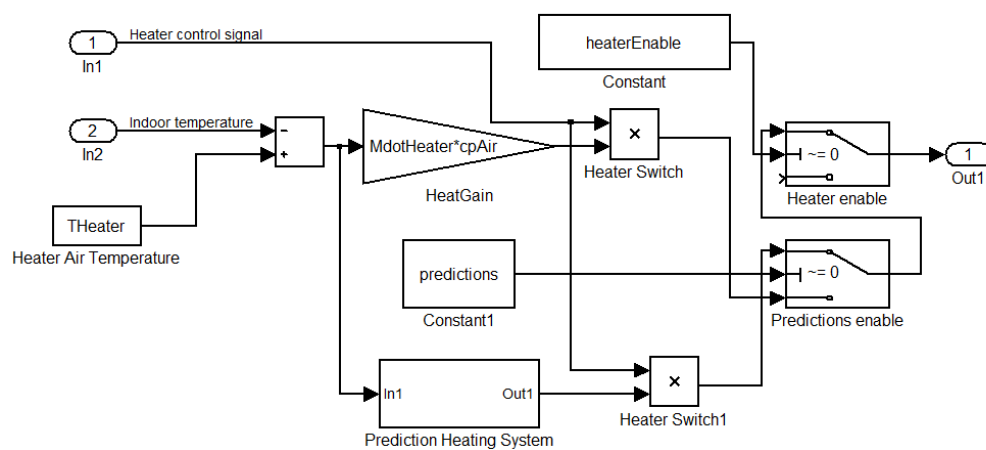
$$\dot{Q}_{heater} = (T_{heater} - T_{room}) * \dot{M}_{heater} * cp_{air} \quad (5.5)$$

v kateri je T_{heater} temperatura grelca, T_{room} notranja temperatura prostora, \dot{M} masni pretok zraka skozi grelec ter cp_{air} specifična toplota zraka. Signal `Heater control signal` skrbi za regulacijo grelca. Na sliki 5.7 je mogoče opaziti še dve stikali. To sta `Predictions enable` in `Heater enable`. S prvim se lahko določi upoštevanje vremenske napovedi, z drugim pa izklop in vklop grelca. Orientacija stikal se tudi definira pred samim začetkom simulacije.

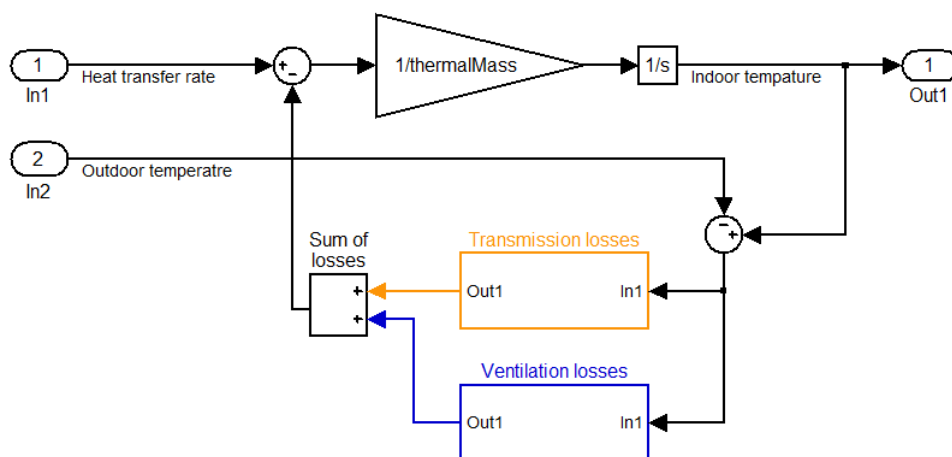
Implementacija podsistema `Air Conditioner` sledi podobnemu konceptu, zato na tem mestu slika ni priložena. Vendar pa v tem podsistemu nimamo možnosti upoštevanja vremenske napovedi.

Dinamiko stavbe prikazuje slika 5.8 tj. spreminjanje notranje temperature prostora skozi čas. Spreminjanje notranje temperature prostora določa enačba 5.4. Toplotnemu toku na vhodu `In1` se odšteje vsoto transmisijskih in ventilacijskih toplotnih izgub (dobitkov). Te izračunamo v podsistemi `Transmission heat losses` in `Ventilation heat losses`, ki sta prikazana na slikah 5.9 in 5.10.

Vsoto vseh toplotnih tokov se nato deli s toplotno kapacitivnostjo celotne



Slika 5.7: Implementacija grelca.



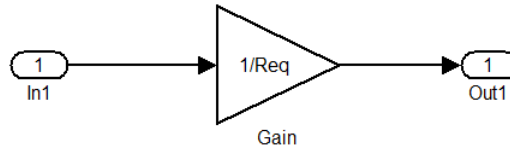
Slika 5.8: Dinamika stavbe.

stavbe ter integrira. Na ta način se izračuna toplotno energijo v prostoru. Temperatura prostora je indikacija toplotne energije shranjene v prostoru.

Izgube, ki nastanejo pri prehodu toplote skozi ovoj stavbe, se izračuna z matematično formulo 5.6

$$\dot{Q}_{trans} = \frac{T_{in} - T_{out}}{R_{eq}} \quad (5.6)$$

kjer je T_{in} notranja temperatura prostora, T_{out} temperatura okolice in R_{eq} ekvivalentna nadomestna upornost celotnega ovoja stavbe. Na sliki 5.9 vhod In1 predstavlja temperaturno razliko med prostorom in okolico. Ta vrednost, pomnožena z $1/R_{eq}$ na izhodu Out1 predstavlja transmisijske izgube iz enačbe 5.6.

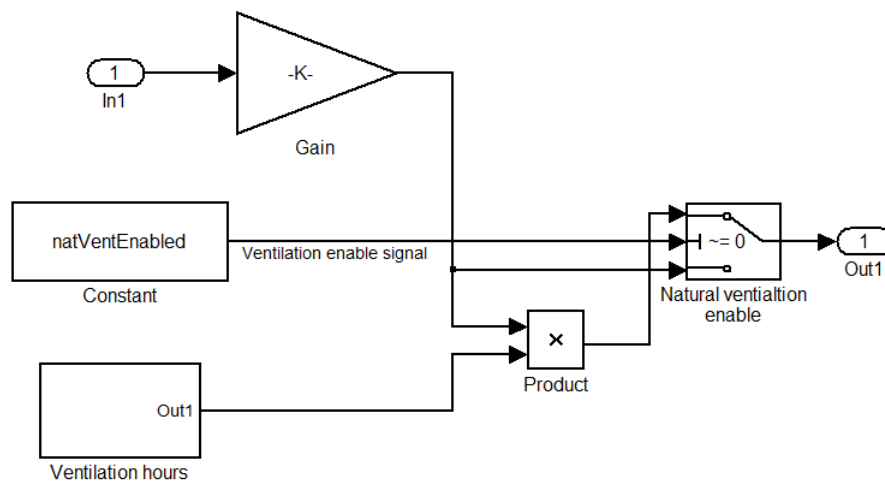


Slika 5.9: Toplotne izgube pri prehodu toplote skozi ovoj stavbe.

Ventilacijske izgube so prikazane na sliki 5.10 in se izračunajo na nekoliko drugačen način. Enačba 5.7 predstavlja izračun ventilacijskih izgub, kjer so ρ_{air} gostota zraka, cp_{air} specifična toplota zraka, V_{room} volumen ogrevanega prostora in n_{min} faktor minimalnega prezračevanja prostora.

$$\dot{Q}_{vent} = (T_{in} - T_{out}) * \rho_{air} * cp_{air} * V_{room} * n_{min} \quad (5.7)$$

Poleg tega je v tem podsistemu še stikalo `Natural ventilation enable`, ki ponuja možnost naravnega prezračevanja. Časovno okno prezračevanja se definira pred začetkom simulacije.



Slika 5.10: Toplotne izgube pri prezračevanju.

Poglavje 6

Rezultati

V sledečem poglavju so predstavljeni rezultati različnih simulacij implementiranega matematičnega modela stavbe.

Simulacije toplotnega odziva stavbe se nahajajo v prvem delu. V vsaki simulaciji je bilo uporabljeno drugačno časovno okno v TRL (testno referenčno leto). S to vrsto simulacije smo želeli pokazati, kako se notranja temperatura prostora spreminja v odvisnosti od temperature okolice.

Drugi in tretji del tega poglavja obsegata simulacije dinamike stavbe v dveh različnih tednih v TRL. Prvi teden je bil izbran v zimskem, drugi pa v poletnem obdobju. Različni scenariji so bili pri tem uporabljeni in testirani, z namenom prikaza potencialnih prihrankov pri ogrevanju oziroma hlajenju stavbe.

Rezultati potrošene energije ter deleži prihrankov so vključeni v zadnjem delu tega poglavja.

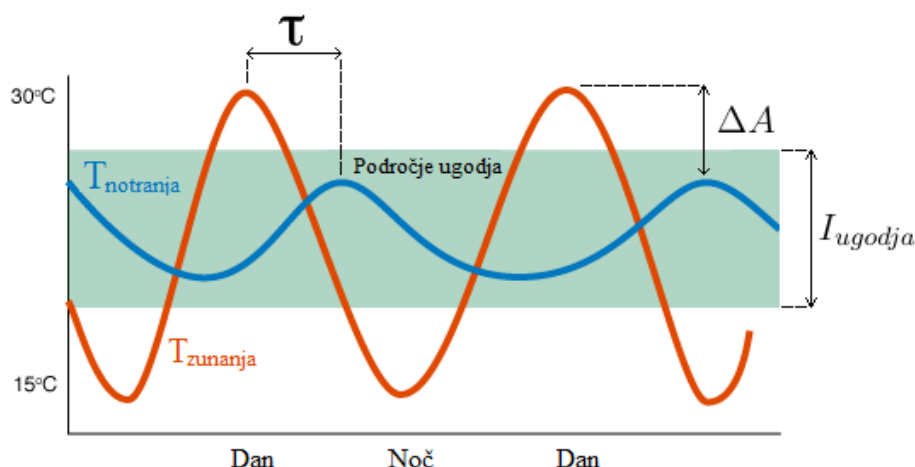
6.1 Toplotni odziv stavbe

Toplotni odziv stavbe pove, na kakšen način se notranja temperatura prostora spreminja v odvisnosti od zunanje temperature.

Šolski primer toplotnega odziva stavbe je prikazan na sliki 6.1. Na grafu sta funkciji notranje in zunanje temperature označeni z modro oziroma oran-

žno barvo. Področje ugodja je definirano z intervalom I_{ugodja} .

Časovna zakasnitev ali tudi fazni zamik med lokalnim maksimumom (minimumom) zunanje in notranje temperature je na grafu iz slike 6.1 označen z malo grško črko τ (tau). Razlika amplitud funkcij notranje in zunanje temperature je označena z ΔA .



Slika 6.1: Toplotni odziv stavbe. Vir: [18].

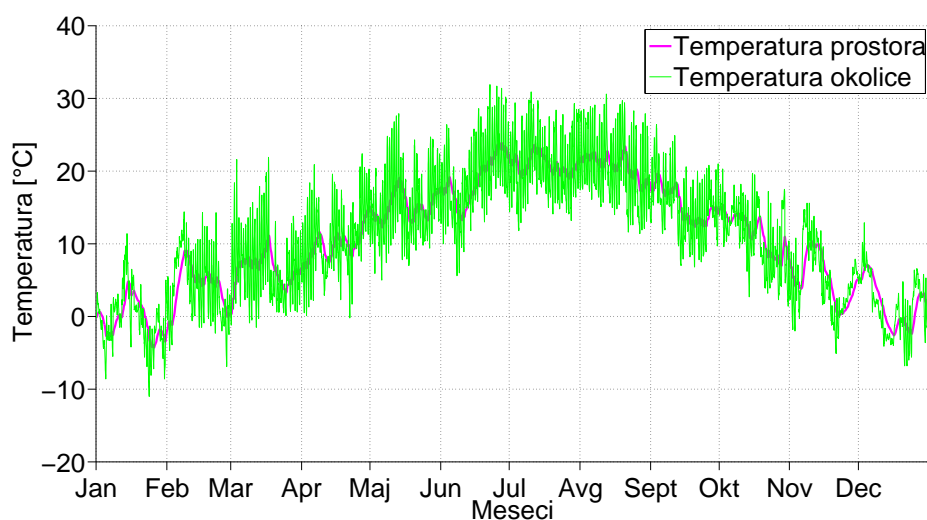
Tako časovna zakasnitev kot tudi razlika amplitud sta posledici toplotne kapacitivnosti celotne stavbe. Ali povedano bolj preprosto, odvisni sta od mase in vrste materiala iz katerega je narejena stavba. Toplotna kapacitivnost je sposobnost materiala da absorbira, akumulira ter sprošča toplotno energijo skozi daljše časovno obdobje.

Simulacija toplotnega odziva modela stavbe, ki smo ga definirali je bila izvedena na enostaven način. V modelu smo onemogočil delovanje vseh HVAC sistemov (angl. *Heating, Ventilation and Air Conditioning systems*). Pri tem smo bili pozorni na to, s kakšnim časovnim zamikom in temperaturno amplitudo temperatura prostora sledi tisti iz okolice.

Ugotovili smo, da je hitrost spreminjanja temperature prostora v večini odvisna od mase celotnega sistema tj. ovoja stavbe. V to smo se prepričali z večjim številom simulacij, pri katerih smo spreminjali le parameter mase

stavbe. Za večje mase stavbe se je temperatura prostora pričakovano spreminjala počasneje kot v primerih manjših mas. Manjša kot je bila masa stavbe, hitreje je temperatura prostora sledila zunanji temperaturi. Masa stavbe je premosorazmerna s časovnim zamikom τ in razliko amplitud ΔA .

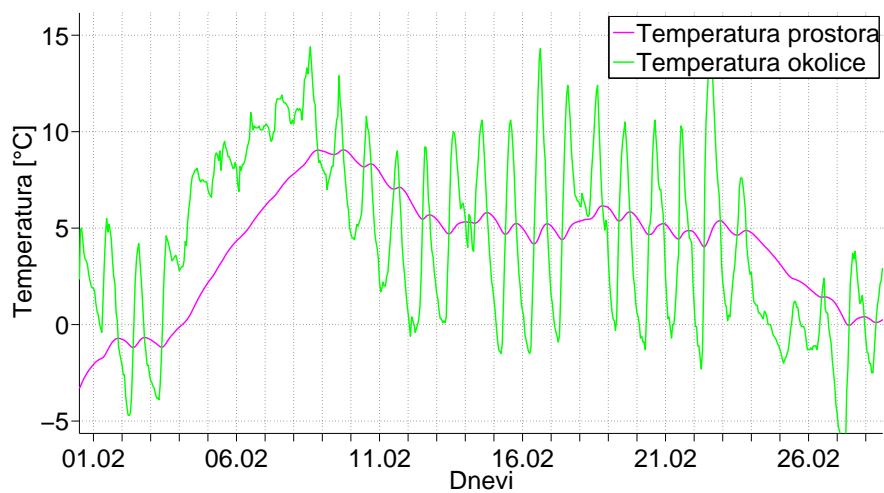
Letni, mesečni ter tedenski poteki toplotnega odziva stavbe so prikazani na slikah 6.2, 6.3 oziroma 6.4. Slednje slike prikazujejo, kako se je notranja temperatura prostora spreminjala v odvisnosti od temperature okolice, če so bili vsi HVAC sistemi izključeni.



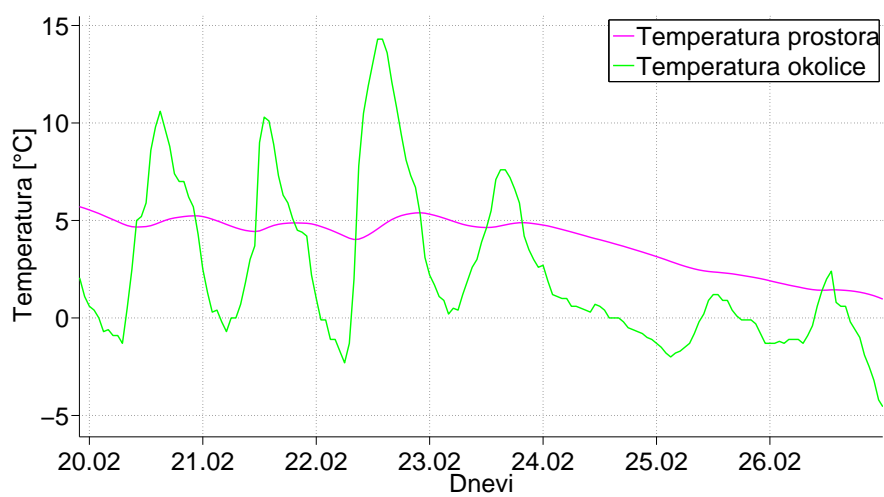
Slika 6.2: Toplotni odziv stavbe skozi celotno leto.

Slika 6.2 prikazuje graf s toplotnim odzivom skozi celotno leto. Na abscisni osi so označeni posamezni meseci iz testnega referenčnega leta, na ordinatni osi pa je označena temperaturna skala. Funkcija temperature okolice je označena z zeleno barvo, medtem ko je temperatura prostora označena z viola barvo. Opazimo lahko, kako se temperatura prostora prilagaja tisti iz okolice.

Bolj natačen potek toplotnega odziva lahko bralec vidi na sliki 6.3. Na tej sliki je prikazan toplotni odziv v mesecu februarju. Posamezni dnevi v mesecu so označeni na abscisi, na ordinati je temperaturna skala. Na začetku



Slika 6.3: Toplotni odziv stavbe za mesec februar.



Slika 6.4: Toplotni odziv stavbe za teden v februarju.

meseca, približno med dnevoma 04.02. in 10.02. temperatura narašča, kar se tudi odrazi na notranji temperaturi. Med dnevoma 16.02. in 21.02. vidimo, kako je lokalni dnevni maksimum oziroma minimum notranje temperature zakasnen glede na tistega od zunanje temperature. Opazno manjša je tudi amplituda notranje temperature. Sledi manjši padec zunanje temperature med dnevoma 24.02. in 27.02., kar se enako kot na začetku meseca pozna na notranji temperaturi.

Graf toplotnega odziva med dnevoma 20.02. in 27.02. je prikazan na sliki 6.4.

6.2 Simulacija v zimskem letnem času

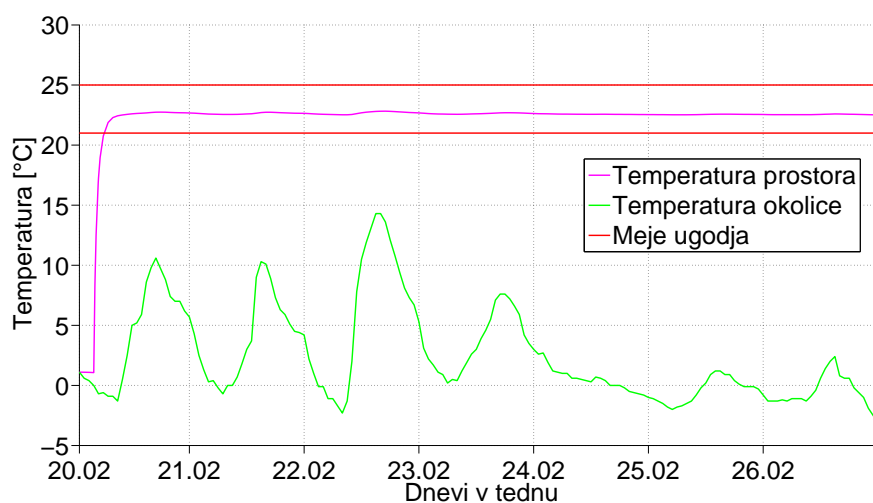
Za simulacije v zimskem letnem času smo izbrali obdobje enega tedna v februarju, natančneje med dnevoma 20.02. in 27.02. Kot cilj smo postavili optimizacijo porabe energije za ogrevanje stavbe. Pri tem je bila upoštevana omejitev, da se mora temperatura prostora vedno nahajati v področju ugodja.

Področje ugodja smo definirali v intervalu $[T_{set} - K, T_{set} + K]$, pri katerem je T_{set} želena (nastavljena) temperatura in K pozitivna konstanta, ki določa razpon področja ugodja. V simulaciji smo upoštevali $T_{set} = 23^{\circ}\text{C}$ ter $K = 2^{\circ}\text{C}$. Iz tega sledi, da je bilo področje ugodja v intervalu $[21^{\circ}\text{C}, 25^{\circ}\text{C}]$. Za regulacijo temperature prostora smo v teh simulacijah uporabili PID krmilnik.

6.2.1 Energijsko neučinkovito ogrevanje stavbe

V tej simulaciji smo želeno temperaturo prostora ohranjali konstantno skozi celoten teden. Pri tem režimu ogrevanja niso bile upoštewane nobene druge omejitve.

S tem scenarijem smo se med drugim tudi prepričali in preverili pravilno delovanje matematičnega modela stavbe. Posledica preprostosti simulacije je bila seveda slaba energijska učinkovitost stavbe.



Slika 6.5: Energijsko neučinkovito ogrevanje stavbe.

Potek omenjenega načina ogrevanja prostora je viden na grafu iz slike 6.5. Področje ugodja - spodnjo in zgornjo mejo na grafu označujeta rdeči horizontalni črti. Temperatura okolice je prikazana z zeleno barvo med tem, ko je temperatura prostora označena z viola barvo.

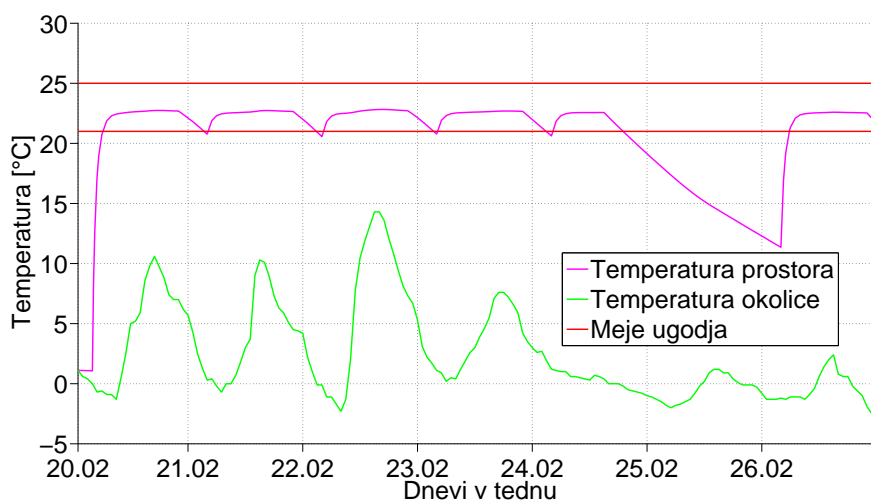
Za prostor smo predpostavili, da je bil dolgo časa neogrevan. Začetna notranja temperatura je bila zato inicializirana na enako vrednost kot zunanja ob tistem času. Grelec smo zaradi boljše vizualizacije vklopili s kratkim zamikom. Prostor se je nato ogrel na želeno temperaturo 23°C. Temperatura prostora se je čez celoten teden nahajala v področju ugodja, kakor je razvidno tudi iz grafa.

Že takoj na prvi pogled lahko ugotovimo, da je slednji način ogrevanja prostora zelo energijsko neučinkovit. S takim načinom ogrevanja se potroši več energije, ker stavbo ogrevamo praktično celoten čas tudi takrat kadar v njej ni prisotnih oseb. Način ogrevanja, pri katerem smo upoštevali tudi čas obratovanja same stavbe, je prikazan v naslednjem scenariju.

6.2.2 Upoštevanje obratovalnega časa stavbe

Pri tem načinu ogrevanja smo stavbo ogrevali le v času njenega obratovanja. V času neobratovanja so bili HVAC sistemi izključeni. Predpostavili smo, da je obratovalni čas stavbe od ponedeljka do petka, od 06:00 do 21:00 ter v soboto od 06:00 do 14:00. V nedeljo je stavba zaprta.

Stavbo smo v času njenega obratovanja ogrevali na 23 °C. Simulacija takega način ogrevanja je prikazana na grafu iz slike 6.6. Na prehodu iz enega v drugi dan opazimo en velik ter nekaj manjših padcev temperature prostora. To je posledica izklopljenega grelca v času neobratovanja. Bistveno večje zmanjšanje temperature je opazno proti koncu 24.02. Na ta dan je očitno sobota, ker z gretjem prostora zaključimo prej kot v preostalih dneh. Padanje temperature se nadaljuje tudi v naslednji dan (25.02.), ker je takrat gretje povsem izklopljeno.



Slika 6.6: Ogrevanje v času obratovanja.

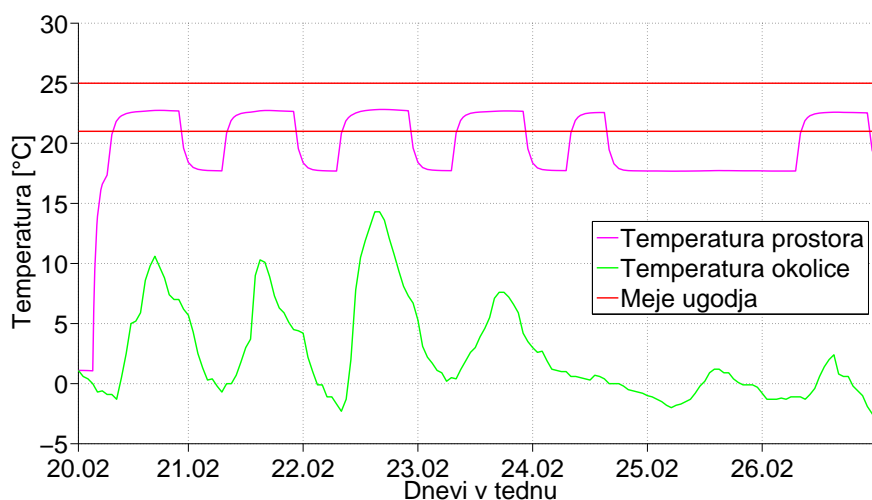
Za zagotavljanje želene temperature prostora v času obratovanja stavbe smo grelec vključili že 3 ure pred začetkom obratovanja. Z vklopom in izklopom grelca smo na ta način pri porabi energije dosegli opazne prihranke. Rezultati so zbrani v poglavju 6.4.

Zanimalo nas je tudi, ali je mogoče prihraniti določen delež toplotne energije, v primeru če stavbo ogrevamo še določen čas po koncu obratovanja. Ideja je bila v tem, da bi s podaljšanim gretjem dosegli akumulacijo toplote v ovoj stavbe. Na ta način bi lahko v naslednjem dnevu pričeli z ogrevanjem nekoliko kasneje kot ponavadi. Čas ogrevanja smo po zaprtju podaljševali za od 1 do 3 ure, naslednji dan pa tudi kasneje pričeli z ogrevanjem.

Po izvedenih simulacijah smo ugotovili, da bistvenih prihrankov na ta način ni mogoče doseči. Pomembno je omeniti, da se vsi dosednji rezultati in zaključki, ki smo jih naredili nanašajo izključno na ta matematični model stavbe. Poleg tega da je reprezentativnost modela zelo osnovna, so bile v njem narejene še številne predpostavke in poenostavitve.

6.2.3 Dnevni in nočni režim ogrevanja

Ta scenarij predstavlja razširitev načina ogrevanja predhodnega scenarija. Grelec je bil v tem primeru nastavljen na dnevni režim, če je stavba obratovala, sicer pa je bil v nočnem režimu. V dnevnem režimu smo temperaturo prostora vzdrževali na 23 °C, v nočnem na 18 °C.



Slika 6.7: Ogrevanje z dnevnim in nočnim režimom.

Na sliki 6.7 je prikazan graf, ki smo ga pridelali po simuliranju tega načina ogrevanja. Po zaprtju stavbe smo prostor ohladili na temperaturo 18°C in ga na tej ravni vzdrževali do začetka obratovanja.

Tudi pri tem scenariju smo na začetku predpostavili, da stavba dolgo časa ni bila ogrevana. Slednji način ogrevanja je dosegel malenkost večje prihranke v primerjavi s predhodnim. Opazno večji pa so, če jih primerjamo z prvim scenarijem.

6.2.4 Upoštevanje vremenske napovedi

Pri tej simulaciji smo iz TRL (testno referenčno leto) poleg trenutne upoštevali še prihodnjo zunanjo temperaturo. V TLR smo imeli podatke o temperaturi okolice znane vnaprej, zato smo slednje obravnavali kot eksaktno vremensko napoved.

Zastavili smo si naslednje vprašanje: *ali je mogoče z informacijo o vremenski napovedi doseči kakršne koli prihranke energije pri ogrevanju stavbe?* Odgovor na to vprašanje ni bil preprost. Prvi korak je bil ta, da smo določili pristop ogrevanja, ki je temeljil na informaciji o prihodnji temperaturi okolice.

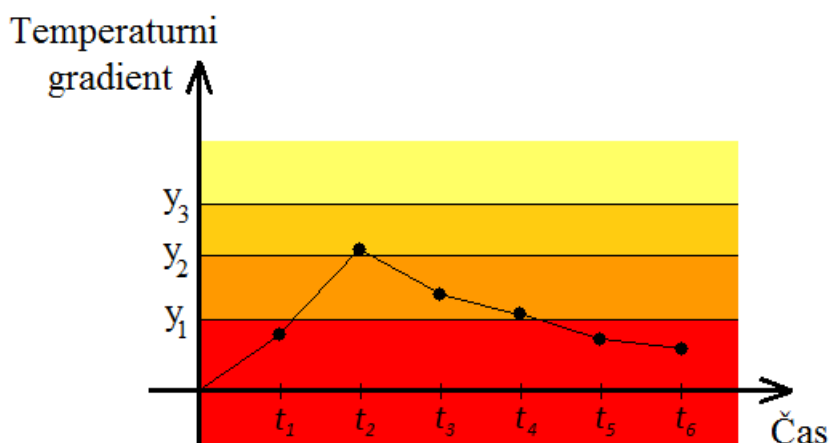
V ta namen smo določili predikcijski horizont. S tem simulacijskim parametrom smo določili koliko časa vnaprej bomo gledali temperaturo okolice. Omenjeni termin se v literaturi pojavlja na veliko mestih, vendar v nekoliko drugačnih kontekstih.

Iskanja možnih prihrankov smo se lotili na naslednji način. V vsakem simulacijskem koraku smo izračunali gradient napovedane zunanje temperature. Gradient zunanje temperature nam je služil pri regulaciji masnega pretoka grelca. Grelec smo nato regulirali na ta način, da smo preverili v katerem intervalu se nahaja temperaturni gradient. Vsak interval pomeni različen masni pretok grelca.

V prejšnjem odstavku omenjeni intervali so prikazani na sliki 6.8. Zalogo vrednosti temperaturnega gradienta smo razdelili na štiri intervale in sicer: $(-\infty, y_1]$, $(y_1, y_2]$, $(y_2, y_3]$ in (y_3, ∞) . Posamezen interval je definiral masni

pretok grelca. Področja s toplejšo barvo predstavljajo večje masne pretoke.

Simulacije so bile izvedene z različnimi vrednostmi časovnega horizonta. Po dobljenih rezultatih smo prišli do spoznanja, da bistvenih prihrankov s tem pristopom ogrevanja ni moč doseči. Slabši rezultati od pričakovanj so povezani predvsem z dvema razlogoma.



Slika 6.8: Intervali temperaturnega gradienta.

Prvi se postavlja sam po sebi in izvira iz funkcije zunanje temperature v simulacijskem tednu iz slike 6.4. Pozoren bralec bo ugotovil, zakaj je temu tako. Opazimo lahko, da je časovni delež vseh intervalov, v katerih temperatura narašča sorazmerno majhen. Torej smo si že na samem začetku omejili možnosti prihrankov. Pri tem je pomembna tudi izbira gradientnih intervalov, ki so določeni z vektorjem $y_{grad} = [y_1, y_2, y_3]$. Velike vrednosti y_1, y_2, y_3 še dodatno zmanjšujejo že tako majhne potencialne prihranke.

Drugi razlog se skriva v masi stavbe, ki smo jo predpostavili v matematičnem modelu. Velika masa pomeni tudi veliko vztrajnost stavbe. Iz tega sledi, da bodo časovni odziv in razlike v amplitudah velike. Akumulacija energije v prostoru je zaradi tega tudi pri velikih dnevnih amplitudah majhna. Na ta način tudi iz naslova toplotne akumulacije prihranki odpadejo.

Nujno je poudariti, da so navedeni zaključki in rezultati plod simulacij na-

šega matematičnega modela stavbe. Možnosti, da bi se enak način ogrevanja na drugače definiranem modelu bolje izkazal, ne izključujemo.

6.3 Simulacija v poletnem letnem času

Za potrebe simulacij v poletnem času smo določili teden med 07.07. in 14.07. Z razliko od scenarijev v zimskem času pri teh nismo upoštevali omejitve, da se mora temperatura nahajati v temperaturnem območju ugodja. To smo naredili preprosto iz tega razloga, ker smo želeli stvari poenostaviti.

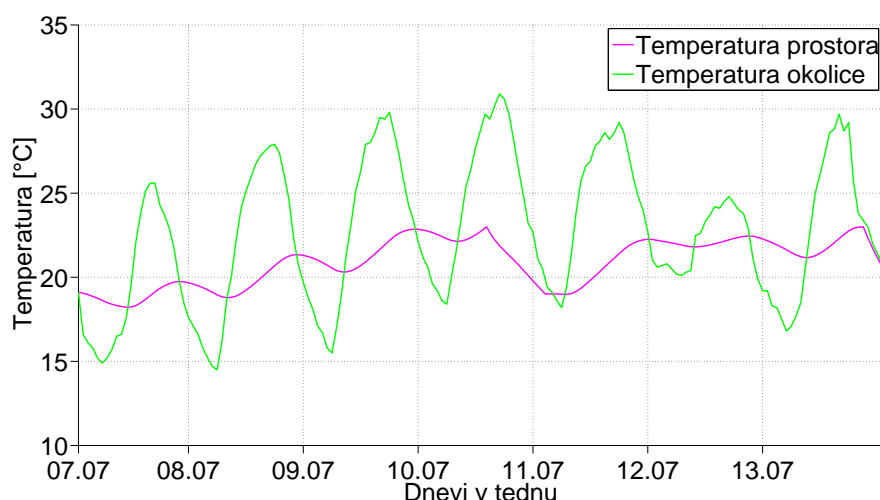
Referenčno temperaturo smo zaradi velike toplotne kapacitivnosti stavbe nastavili nekoliko nižje in sicer na 21 °C. V poletnem letnem času je priporočljivo, če je notranja temperatura prostora nastavljena med 24 °C in 26 °C. V tem primeru smo prišli do spoznanja, da hlajenje stavbe sploh ne bi bilo potrebno. Po vsej verjetnosti je bil razlog v tem, da v matematičnem modelu nismo upoštevali solarnih dobitkov.

Ker smo kljub vsemu želeli pokazati dva scenarija iz poletnega časa, smo želeno temperaturo prostora nastavili na že omenjenih 21 °C. V praksi se običajno taki primeri pojavljajo samo v veleblagovnicah. Prostor smo tokrat za spremembo regulirali z ON/OFF tipom regulacije.

6.3.1 Običajno hlajenje stavbe

Pri običajnem hlajenju stavbe smo z ON/OFF regulatorjem vklopili klimatsko napravo v primeru ko je temperatura prostora za 2 °C presegla želeno temperaturo. Kadar se je temperatura prostora spustila 2 °C pod nastavljeno temperaturo se je klimatska naprava izklopila.

Slika 6.9 predstavlja običajno hlajenje stavbe z ON/OFF regulacijo v poletnem času. Pozoren bralec lahko vidi, da se je klimatska naprava zaradi velike toplotne vztrajnosti stavbe vklopila le dvakrat v celotnem tednu. To se je zgodilo v sredini dneva 10.07. in proti koncu 13.07. Opazimo lahko tudi naraščanje notranje temperature prostora, ki se je po približno 3 dnevih in pol od začetka le dvignila na 23 °C. Temperatura prostora doseže 23 °C sredi



Slika 6.9: Hlajenje prostora z ON/OFF regulacijo.

dne 10.07. V tistem trenutku se vključi klimatska naprava, kar se odrazi na takojšnjem zmanjševanju temperature prostora.

6.3.2 Hlajenje z nočnim prezračevanjem

Cilj nočnega prezračevanja je bil ta, da smo stavbo v nočnem času poskušali čim bolj ohladiti in tako akumulirati energijo v masi stavbe. Na ta način smo naslednji dan z ohlajanjem prostora pričeli nekoliko kasneje.

Za ta namen smo v nočnem času določil 5 intervalov, v katerih smo stavbo prezračevali. Rezultate smo nato med seboj primerjali. Ugotovili smo, da se s pomočjo nočnega prezračevanja lahko doseže nekaj prihrankov, vendar pa morajo biti za to izpolnjeni določeni pogoji. Prvič, amplitudna razlika med nočno in dnevno temperaturo mora biti dovolj velika. In drugič, ponoči se mora temperatura okolice zelo spustiti, da se lahko toplotna energija akumulira v stavbi.

6.4 Poraba energije

Vrednosti upoštevanih simulacijskih parametrov, poraba energije ter prihranki določenega simulacijskega scenarija v obdobju od 20.02. do 27.02. so prikazani v tabeli 6.1. Prvi in tudi najmanj energijsko učinkovit način ogrevanja je bil izbran za referenčni scenarij. Glede na tega smo nato primerjali delež prihrankov pri ostalih scenarijih. Pri prvem simulacijskem scenariju obratovalni čas stavbe in vremenska predikcija nista bili upoštevani. Temperaturo prostora smo celoten čas vzdrževali na 23 °C.

Pri drugem scenariju smo temperaturo prostora vzdrževali na enaki temperaturi kot pri prvem scenariju. Za razliko od prvega, smo pri tem upoštevali še čas obratovanja stavbe, ki smo ga definirali v razdelku 6.2.2. Izkoristek energije je bil pri tem načinu ogrevanja za 7,7 % boljši od izkoristka referenčnega scenarija. Absolutni prihranek je bil v tem primeru 46 MJ energije.

Simulacijski parametri	Scenarij 1 (referenca)	Scenarij 2	Scenarij 3	Scenarij 4
Obratovalni čas stavbe	-	✓	✓	✓
Vremenska predikcija	-	-	-	✓
Dnevna (set-forward) temperatura	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C
Nočna (set-back) temperatura	23 °C	23 °C	18 °C	18 °C
Poraba energije	598 MJ	552 MJ	537 MJ	535 MJ
Relativen prihranek	-	7,7 %	10,4 %	10,8 %
Absolutni prihranek	-	46 MJ	61 MJ	63 MJ

Tabela 6.1: Simulacijski parametri in poraba energije za posamezen simulacijski scenarij v časovnem obdobju od 20.02. do 27.02.

Tretji scenarij, pri katerem sta bila upoštevana še dnevni in nočni režim ogrevanja, je dosegel še malenkost boljše rezultate. Pri tem scenariju se je temperatura v nočnem režimu vzdrževala na 18 °C ter v dnevnem režimu na 23 °C. Absolutni prihranek je v tem primeru znašal 61 MJ energije, relativni prihranek pa 10,4 %.

Prihranke v zadnjem simulacijskem scenariju smo poskušali doseči še s pomočjo informacije o trenutni vremenski napovedi. Izmed vseh razpoložljivih

meteoroloških spremenljivk smo v obzir vzeli le bodočo zunanjo temperaturo. S tem načinom ogrevanja smo dosegli 10,8 % prihranek glede na prvi način ogrevanja. To je le 0,4 % prihranek v primerjavi s tretjim scenarijem. Doseženi prihranki s pomočjo vremenske predikcije se na ta način razumljivo zdijo majhni. Na majhnih objektih se prihranki pri stroških ogrevanja ne bodo tako izrazito poznali. Vendar se je potrebno zavedati, da bi pri ogrevanju velikih objektov kot so bolnišnice, šole, fakultete itd., prihranki naenkrat postali veliko bolj izraziti.

V poletnem času sta bili izvedeni le dve vrsti simulacij ohlajevanja stavbe in sicer v obdobju od 07.07. do 14.07. Pri prvem scenariju ohlajevanja se je klimatska naprava vklopila oziroma izklopila, kadar je temperatura prostora presegla določen prag. V tem primeru smo za ohlajanje stavbe iz slike 6.9 porabili okoli 36 MJ energije.

V drugem poletnem scenariju smo stavbo v nočnem času še prezračevali. Konstanta prezračevanja je bila definirana pred začetkom simulacije. Prezračevanje smo naredili v 5 različnih časovnih intervalih in sicer: 20:00 - 06:00, 21:00 - 07:00, 21:30 - 07:30, 22:00 - 08:00, 22:30 - 08:30. V povprečju smo s tem načinom ohlajevanja stavbe porabili 32 MJ energije. To predstavlja 12,2 % prihranek energije v primerjavi s prvim načinom ohlajanja.

Poglavje 7

Diskusija in zaključek

Na podlagi pridobljenih rezultatov opisanih v razdelku 6.4, smo ugotovili, da lahko že z nekoliko bolj premišljenim načinom ogrevanja in hlajenja stavbe dosežemo bistvene prihranke, pri porabi energije.

V zimskem letnem času so bile izvedene simulacije v obdobju od 20.02. do 27.02. Z upoštevanjem obratovalnega časa stavbe smo tako dosegli 7,7 % relativnega prihranka energije pri ogrevanju v primerjavi z referenčnim scenarijem. Implementacija nočnega in dnevnega režima ogrevanja nam je zagotovila še nekoliko večji, 10,4 % relativen prihranek. Manjši dodatni, pa vendar omembe vredni prihranki so bili doseženi s pomočjo informacije o vremenski napovedi. Pri tem smo upoštevali le bodočo temperaturo okolice ter dosegli 10,8 % relativnega prihranka glede na referenčni scenarij.

Prihranke pri porabi energije nam je uspelo doseči tudi v poletnem času. Simulacije so bile izvedene za obdobje enega tedna in sicer od 07.07. do 14.07. Z dodatnim prezračevanjem stavbe ponoči smo dosegli 12,2 % prihranek.

Rezultati, ki so bili v tem diplomskem delu pridobljeni, niso in tudi ne morejo biti končni. Razlogi za to se nahajajo predvsem v omejenem času, ki je namenjen izdelavi diplomskega dela. Potrebno je tudi poudariti, da smo implementirali zelo preprost model stavbe. Boljše rezultate bi z veliko verjetnostjo dobili že, če bi imeli na voljo bolj natančen matematičen opis modela. Simulacije so bile poleg tega izvedene le na nekompleksnih scenarijih.

To pomeni, da smo upoštevali le osnovne scenarije, ne pa tudi tistih, ki se pojavijo ob prisotnosti izrojenih pogojev. Nadaljne delo vidimo predvsem v treh glavnih smereh.

V prvi smeri se nahaja povečevanje in izboljševanje reprezentativnosti matematičnega modela stavbe. Na tem področju bi bilo potrebno modelu stavbe dodati nove toplotne vire. Primeri teh so na primer naprave, razsvetljava in ljudje v prostoru. Omeniti velja še upoštevanje sončnega sevanja, ki je zelo pomemben dejavnik predvsem v poletnem času. V kolikor bi hoteli doseči še bolj kompleksno dinamiko stavbe bi bilo potrebno ljudi v prostoru in vremensko napoved modelirati kot stohastična procesa.

Druga smer pelje v načrtovanje in analizo optimalnih kontrolnih strategij za potrebe ogrevanja in hlajenja. V zasnovo omenjenih strategij bi bilo potrebno obvezno vključiti še vremensko napoved, pri kateri bi poleg temperature okolice denimo upoštevali še sončno sevanje in relativno vlažnost zraka.

Določanje scenarijev z izrojenimi pogoji in opazovanje uspešnosti implementiranega sistema vidimo kot tretjo smer za nadaljne delo. Osnovna primera takih scenarijev bi bila denimo nenadno povečanje oziroma zmanjšanje zunanje temperature.

Poleg tega pa bi se bilo problema zanimivo ponovno lotiti z interdisciplinarno skupino raziskovalcev. V slednji bi denimo sodelovali posamezniki iz področji strojništva, fizike, računalništva, elektrotehnike in arhitekture. Arhitekt bi denimo opravil natančen pregled in popis vseh lastnosti materialov iz katerih je narejena stavba. Strokovnjaka iz področja strojništva in fizike bi v model vključila še dodatne toplotne dobitke (solarni dobitki, notranji toplotni dobitki itd.). Prav tako bi lahko z njunim znanjem naredili delovanje HVAC sistemov (angl. *Heating, Ventilation and Air Conditioning systems*) veliko bolj kompleksno in obenem tudi realno. Naloga, ki bi jo med drugim imela, bi bila izdelava in priprava natančnega matematičnega opisa dinamike stavbe. Elektrotehnika na tem mestu vidimo kot trdno vez med računalnikarjem na eni strani ter fizikom in strojnikom na drugi. Izdelava abstraktnega

toplotnega modela stavbe bi bila njegova prednostna naloga. S pomočjo celotne interdisciplinarne skupine bi računalnikar nato implementiral model v enem izmed programskih jezikov. Model bi moral biti zasnovan tako, da je robusten, razširljiv ter skalabilen. Z agregacijo znanj iz zgoraj omenjenih področij bi na ta način dosegli večjo reprezentativnost matematičnega modela in izboljšali natančnost rezultatov.

Modeliranje in simulacija dinamičnih sistemov kot so stavbe, je in bo v prihodnje vedno bolj aktualna. Predvsem zaradi čedalje večjih stroškov povezanih z vzdrževanjem udobja v stavbi in iskanjem potencialnih prihrankov. Prepričano smo, da je na tem področju še ogromno manverskega prostora za nadaljnje raziskave. Verjamemo, da se bodo z nadaljnjim razmahom vseprisotnega računalništva v prihodnje že v vse novogradnje privzeto integrirali CNS (centralno nadzorni sistemi) za krmiljenje HVAC sistemov. Z učinkovitimi in pametnimi strategijami in načini upravljanja le-teh, je mogoče doseči občutne prihranke pri porabi energije. Tudi z upoštevanjem vse bolj natančne vremenske napovedi.

Literatura

- [1] B. Dong, K. Lam in C. Neuman, "Integrated building control based on occupant behavior pattern detection and local weather forecasting", v zborniku *12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Sydney, Avstralija, nov. 2011.
- [2] A. Ebrahimpour, M. Maerefat, "A method for generation of typical meteorological year", *Energy Conversion and Management*, zv. 51, str. 410-417, 2010.
- [3] J. M. Finkelstein, R. E. Schafer, "Improved goodness-of-fit tests", *Biometrika*, zv. 58, str. 641-645, 1971.
- [4] Branko Gašperšič, Leopold Škerget, *Prenos toplote*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2001.
- [5] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 2006.
- [6] R. Jain, *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*, Wiley, 1991.
- [7] Z. O'Neill, S. Narayanan in R. Brahme, "Model-based thermal load estimation in buildings", v zborniku *4th National Conference of IBPSA-USA*, New York City, New York, avg. 2010.

-
- [8] F. Oldewurtel, A. Parisio, C. N. Jones in ostali, "Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control", *Energy and Buildings*, zv. 45, str. 15-27, 2012.
- [9] A. Parisio, M. Molinari, D. Varagnolo in K. H. Johansson, "A scenario-based predictive control approach to building HVAC management systems", *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Wisconsin, USA, avg. 2013.
- [10] K. Skeiker, B. Ghani, "Advanced software tool for the creation of a typical meteorological year", *Energy Conversion and Management*, zv. 49, str. 2581-2587, 2008.
- [11] J. Široký, F. Oldewurtel, J. Cigler in S. Prívara, "Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system", *Applied Energy*, zv. 88, str. 3079-3087, 2001.
- [12] A. Thavlov, H. W. Bindner, "Thermal models for intelligent heating of buildings", v zborniku *International Conference on Applied Energy*, Suzhou, Kitajska, jul. 2012.
- [13] S. Wand, X. Xu, "Parameter estimation of internal thermal mass of building dynamic models using genetic algorithm", *Energy Conversion and Management*, zv. 47, str. 1927-1941, 2006.
- [14] Agencija Republike Slovenije za Okolje (ARSO), vremenski portal. Dostopno na: <http://meteo.arso.gov.si/>
- [15] Agencija Republike Slovenije za Okolje (ARSO), arhiv opazovanih meteoroloških spremenljivk. Dostopno na: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive>
- [16] EUR-lex - portal z zakonodajo Evropske Unije, "Direktiva 2012/27/EU o energetske učinkovitosti". Dostopno na: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:SL:PDF>

-
- [17] Eurostat - statistični urad Evropske Unije, "Final energy consumption, by sector in EU 28". Dostopno na:
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=1&language=en&pcode=tsdpc320>
- [18] Greenspec, design for thermal performance: thermal mass, "How thermal mass works". Dostopno na: <http://www.greenspec.co.uk/building-design/thermal-mass/>
- [19] Mathworks documentation center, "Thermal Model of a House". Dostopno na: <http://www.mathworks.com/help/simulink/examples/thermal-model-of-a-house.html>
- [20] Sašo Medved, "Varčna raba energije v stavbah", prosojnice za predavanja št. 11, predmet Energija in Okolje, Fakulteta za Strojništvo. Dostopno na: http://lab.fs.uni-lj.si/kes/energije_in_okolje/eo-predavanje-11.pdf
- [21] Ministrstvo za okolje in prostor, "Učinkovita raba energije", tehnična smernica TSG-1-004, 2010. Dostopno na: http://www.arhiv.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/zakonodaja/prostor/graditev/TSG-01-004_2010.pdf
- [22] Uradni list Republike Slovenije, "Uredba o posredovanju in ponovni uporabi informacij javnega značaja". Dostopno na: <http://www.uradni-list.si/1/objava.jsp?urlid=200576&stevilka=3389>

Dodatek A

Seznam parametrov

oznaka	enota	slovenski izraz	angleški izraz
A	[m ²]	površina	area
cp	[J/kgK]	specifična toplota	specific heat
h, h_0	[W/m ² K]	koeficient toplotne prestopnosti	convection heat transfer coefficient
k, λ	[W/mK]	koeficient toplotne prevodnosti	thermal conductivity
L	[m]	debelina plasti	thickness of material
m	[kg]	masa	mass
R	[K/W]	toplotna upornost	thermal resistance
T	[K]	temperatura	temperature
U	[W/m ² K]	koeficient toplotne prehodnosti	heat transfer coefficient
\vec{q}	[W/m ²]	gostota toplotnega toka	heat flux density
Q	[J]	toplotna energija	thermal energy
\dot{Q}	[W]	toplotni tok	heat transfer rate

Tabela A.1: Seznam parametrov, ki se jih uporablja pri modeliranju stavb.

Dodatek B

Analogija električnih in termodinamičnih veličin

Analogija med električnimi in termodinamičnimi veličinami se pogosto uporablja predvsem pri modeliranju toplotnih izgub stavb. Na primer v fazi izdelovanja toplotnega modela (vezja) temperaturo na ta način obravnavamo analogno napetosti v električnih vezjih. Podobno velja tudi za preostale veličine iz spodnje tabele in za tiste, ki na tem mestu niso omenjene.

tip veličine	termodinamika	elektrika
potencial	temperatura [K]	napetost [V]
tok	toplotni tok [W]	električni tok [A]
upornost	toplotna upornost [K/W]	električna upornost [V/A]
prevodnost	toplotna prevodnost [W/K]	električna prevodnost [A/V]

Tabela B.1: Analogije med fizikalnimi veličinami v termodinamiki in elektriki.

Dodatek C

Izvorna koda

Skripta `buildingModel.m` inicializira vse spremenljivke kot so dimenzijske karakteristike stavbe, koeficienti toplotnih prevodnosti itd. v delovni prostor programa MATLAB. To je potrebno zato, da jih lahko kasneje med izvajanjem simulacij uporablja Simulink.

```
1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % buildingModel %
3 % %
4 % DESCRIPTION %
5 % This script instantiates all building specific %
6 % parameters e.g. building constructions characteristics, %
7 % thermal conduction and convection constants, HVAC systems %
8 % properties, etc. This values are later used in Simulink %
9 % during each simulation step. %
10 % %
11 % author: Rok Prodan %
12 % date: 10.09.2014 %
13 % institution: Faculty of Computer and Information Science %
14 % university: University of Ljubljana %
15 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
16
```

```

17 % — BUILDING CONSTRUCTION CHARACTERISTICS —
18 house.length = 15; % [m]
19 house.width = 10;
20 house.height = 4;
21 numberOfWindows = 6;
22 window.width = 2; % [m]
23 window.height = 2;
24 windowArea = window.width * window.height * numberOfWindows;
25 wallArea = 2 * house.length * house.height + ...
26           2 * house.width * house.height + ...
27           2 * house.width * house.length - windowArea; % [m^2]
28
29 % — THERMAL CONDUCTION —
30 % I. Walls
31 % - Brick
32 LBrick = .29; % Thickness of material [m].
33 kBrick = .6*3600; % Thermal conductivity [W/m*K],
34           % multiplied by 3600 (unit of hours).
35 RBrick = LBrick/(kBrick*wallArea); % Thermal resistance [K/W]
36 % - Mineral wool (isolation)
37 LMineralWool = .1;
38 kMineralWool = .045*3600;
39 RMineralWool = LMineralWool/(kMineralWool*wallArea);
40 % II. Glass surfaces (windows)
41 LWindow = .01;
42 kWindow = .78*3600;
43 RWindow = LWindow/(kWindow>windowArea);
44
45 % — THERMAL CONVECTION —
46 h = .15*3600; % Natural convection of gas (air), [W/K*m^2]
47 RConvectionOutside = 1/(h*(wallArea>windowArea));

```

```

48 RConvectionInside = RConvectionOutside;
49
50 % — SERIES / PARALLEL REDUCTION —
51 % Equivalent thermal resistance for wall component
52 RWall = RBrick + RMineralWool;
53 % Heat conduction component
54 RConduction = RWall*RWindow/(RWall + RWindow);
55 % Heat convection component
56 RConvection = RConvectionOutside + RConvectionInside;
57 % Equivalent thermal resistance for the whole building
58 Req = RConduction + RConvection;
59
60 % — BUILDING THERMAL MASS —
61 % I. WALL (excluded isolation and glass surfaces)
62 cpBrick = 840; % specific heat capacity of brick [J/kg*K]
63 densBrick = 1400; % density of brick [kg/m^3]
64 wallVolume = wallArea * LBrick; % [m^3]
65 brickMass = wallVolume * densBrick; % mass of brick layer [kg]
66 % II. AIR (room)
67 cpAir = 1003.5; % specific heat capacity of air [J/kg*K]
68 densAir = 1.225; % air density [kg/m^3]
69 roomVolume = house.length*house.width*house.height; % [m^3]
70 airMass = roomVolume * densAir; % mass of air in the room [kg]
71 % III. TOTAL THERMAL MASS
72 % M = airMass + brickMass;
73 % c = cpAir + cpBrick;
74 M = 4000; % [kg] — assumption
75 c = cpAir + cpBrick; % [J/kg*K]
76 thermalMass = M * c;
77
78 % — VENTILATION —

```

```
79 nMin = 1/3600; % air exchange rate [1/hr]
80
81 % — HVAC SYSTEMS —
82 % I. HEATER
83 THeater = 45; % heater temperature [degrees Celsius]
84 MdotHeater = 600; % mass flow rate[1 kg/s = 3600 kg/hr]
85 % II. COOLER (fan coil unit)
86 TCooler = 16;
87 MdotCooler = 780;
88
89 % — OTHER CONSTANTS —
90 % Assumption: conversion from electricity to
91 % heat energy is loseless
92 cost = 0.07315/3.6e6; % [eur/kWh]
```

Izvorna koda C.1: Inicializacija vseh karakterističnih vrednosti modela stavbe.

V skripti `runSimulation.m` se ustrezno nastavijo vsi simulacijski parametri, ki so potrebni za uspešen zagon simulacije. Tukaj se izvedejo tudi klici metod za simulacijo, izris grafov in ukazi za izpis rezultatov.

```

1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % runSimulation %
3 % %
4 % DESCRIPTION %
5 % This script instantiates every single parameter %
6 % necessary for the simulation. After that it populates the %
7 % properties structure object which is later used in the %
8 % simulation. Furthermore the simulation is executed in this %
9 % script and corresponding results are plotted. %
10 % %
11 % author: Rok Prodan %
12 % date: 10.09.2014 %
13 % institution: Faculty of Computer and Information Science %
14 % university: University of Ljubljana %
15 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
16
17 % — BUILDING LOCATION —
18 location = 'Ljubljana';
19
20 % — SIMULATION PERIOD —
21 simPeriod.month = 2;
22 simPeriod.day = 20;
23 simPeriod.timeFrame = 7;
24 simPeriod.fullYear = false; % true – simulation over whole year
25
26 % — PREDICTED TEMPERATURE —
27 preHorizon = 0; % prediction horizon [hours]
28 preTemp = initTemperature(simPeriod, location, preHorizon);

```

```
29 |
30 | % — CURRENT TEMPERATURE —
31 | [temp, time] = initTemperature(simPeriod, location, 0);
32 |
33 | % — BUILDING WORKING TIME —
34 | workingTime = initWorkingTime(simPeriod);
35 |
36 | % — ROOM OCCUPANCY —
37 | roomOccupancy = initSchedule(simPeriod);
38 |
39 | % — SIMULATION PROPERTIES —
40 | simProperties.modelName = 'smarthouse';
41 | % Working hours
42 | simProperties.workday = [6, 21]; % [06:00 – 21:00]
43 | simProperties.saturday = [6, 14]; % [06:00 – 14:00]
44 | % Set-back and set-forward temperature [deg Celsius]
45 | simProperties.referenceTemperature = [23, 23];
46 | simProperties.refTempOffset = 2;
47 | simProperties.preHeat = 0; % Preheating time [hours]
48 | % Natural ventilation during the night time
49 | simProperties.natVent = [22, 8]; % [xx:00 – yy:00]
50 | simProperties.natVentEnabled = 0; % 0 – disabled, 1 – enabled
51 | simProperties.predictions = 0; % 0 – exclude, 1 – include
52 | simProperties.deviceSelect = 1; % 0 – Air Conditioner, 1 – Heater
53 | simProperties.heaterEnable = 0; % 0 – disabled, 1 – enabled
54 | simProperties.coolerEnable = 0; % 0 – disabled, 1 – enabled
55 | simProperties.controllerType = 1; % 0 – ON/OFF, 1 – PID
56 | % 0 – working time mode not considered, 1 – otherwise
57 | simProperties.isBuildingWorkingTimeModeEnabled = 0;
58 | % 0 – schedule mode considered, 1 – otherwise
59 | simProperties.isScheduleModeEnabled = 0;
```

```
60 % Initial conditions
61 simProperties.initialOutdoorTemperature = temp.Data(1);
62 simProperties.initialIndoorTemperature = temp.Data(1);
63 simProperties.simulationStopTime = num2str(length(temp.Data));
64 simProperties.fanSpeed = [1, .85, .7, .55];
65 simProperties.gradZone = [.2, .5, 1];
66
67 % — RUN SIMULATION —
68 simOut = doSimulation(simProperties);
69
70 % — RESULTS —
71 plotResult(simOut);
72
73 % — CONSUMED ENERGY & HEAT COST —
74 [e, c] = evaluateConsumption(simOut.get('ConsumedHeat'), ...
75                               simOut.get('HeatCost'));
76
77 fprintf('Total energy consumed [J]: %0.2f\n', e);
78 fprintf('Total energy costs [eur]: %0.3f\n', c);
```

Izvorna koda C.2: Glavna skripta za nastavitev simulacijskih parametrov in izvedbo simulacije.

Funkcija `initTemperature.m` prebere meteorološke spremenljivke iz testnega referenčnega leta glede na obravnavano časovno okno in lokacijo.

```

1 function [ts1,ts2] = initTemperature(s, l, c)
2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3 % initTemperature %
4 % INPUTS: %
5 % s — simulation period (day, month, period, fullYear) %
6 % l — building location %
7 % c — prediction horizon (offset) %
8 % OUTPUTS: %
9 % ts1 — timeseries holding temperature values %
10 % ts2 — timeseries holding time of day(s) %
11 % DESCRIPTION: %
12 % Parses the weather data (more precisely temperatures) %
13 % from a .xls file with respect to simulation period and %
14 % prediction horizon. The function returns two timeseries %
15 % objects. %
16 % %
17 % author: Rok Prodan %
18 % date: 10.09.2014 %
19 % institution: Faculty of Computer and Information Science %
20 % university: University of Ljubljana %
21 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
22
23 % — READ WEATHER DATA FROM A REFERENCE YEAR —
24 refYear = strcat('location\test-ref-year_', l);
25 weatherData = xlsread(refYear);
26
27 % — EXTRACT AND TRIM —
28 if s.fullYear == true
29     temperature = weatherData(:,4);

```



```

30  % Create a horizontal stack
31  simulationTime = repmat((0:23)', 365, 1);
32  else
33  % COL 4 – Temperatures
34  temperature = weatherData(weatherData(:,1)==s.month,4);
35  startIndex = (s.day - 1) * 24 + 1;
36  endIndex = startIndex + 23 + 24 * (s.timeFrame - 1);
37  temperature = temperature(startIndex+c:endIndex+c);
38  % Create a horizontal stack
39  simulationTime = repmat((0:23)', s.timeFrame, 1);
40  end
41
42  % — CREATE 'TIMESERIES' OBJECTS —
43  ts1 = timeseries(temperature, 'Name', 'Temperature');
44  ts1.TimeInfo.Units = 'hours';
45  % Predefined data interpolation type: 'linear'
46
47  ts2 = timeseries(simulationTime, 'Name', 'Time of day');
48  ts2.DataInfo.Interpolation = tsdata.interpolation('zoh');
49  ts2.TimeInfo.Units = 'hours';
50
51  end

```

Izvorna koda C.3: Funkcija za branje meteoroloških podatkov iz testnega referenčnega leta.

Funkcija `doSimulation.m` je namenjena osvežitvi predvsem pa pripravi delovnega prostora MATLAB-a z vrednostmi simulacijskih parametrov, ki so definirani v skripti `buildingModel.m`. Poleg tega se v tej funkciji izvede tudi dejanska simulacija.

```

1  function simRes = doSimulation(simProp)
2  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3  % doSimulation %
4  % INPUTS %
5  % simProp – structure object with simulation properties %
6  % OUTPUTS %
7  % simRes – simulation result object %
8  % DESCRIPTION %
9  % This function starts with preparation of modelworkspace. %
10 % Moreover the function reloads the workspace and assigns %
11 % a new set of variables (simulation properties) to it. %
12 % Finally the simulation with initial properties defined %
13 % is started. %
14 % %
15 % author: Rok Prodan %
16 % date: 10.09.2014 %
17 % institution: Faculty of Computer and Information Science %
18 % university: University of Ljubljana %
19 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
20
21 % —— PREPARE MODEL'S WORKSPACE ——
22 load_system(simProp.modelName);
23 modelWorkspace = get_param(simProp.modelName, 'modelworkspace');
24 modelWorkspace.reload; % Reload the model workspace
25
26 % Overriding model's workspace variables
27 modelWorkspace.assignin('workday', simProp.workday);

```

```

28 modelWorkspace.assignin('saturday', simProp.saturday);
29 modelWorkspace.assignin('natVent', simProp.natVent);
30 modelWorkspace.assignin('natVentEnabled', simProp.
    natVentEnabled);
31 modelWorkspace.assignin('deviceSelect', simProp.deviceSelect);
32 modelWorkspace.assignin('predictions', simProp.predictions);
33 modelWorkspace.assignin('heaterEnable', simProp.heaterEnable);
34 modelWorkspace.assignin('coolerEnable', simProp.coolerEnable);
35 modelWorkspace.assignin('preHeat', simProp.preHeat);
36 modelWorkspace.assignin('refTemperature', simProp.
    referenceTemperature);
37 modelWorkspace.assignin('refTempOffset', simProp.refTempOffset);
38 modelWorkspace.assignin('controllerType', simProp.
    controllerType);
39 modelWorkspace.assignin('isBuildingWorkingTimeModeEnabled',
    simProp.isBuildingWorkingTimeModeEnabled);
40 modelWorkspace.assignin('isScheduleModeEnabled', simProp.
    isScheduleModeEnabled);
41 modelWorkspace.assignin('initialIndoorTemperature', simProp.
    initialIndoorTemperature);
42 modelWorkspace.assignin('initialOutdoorTemperature', simProp.
    initialOutdoorTemperature);
43 modelWorkspace.assignin('fanSpeed', simProp.fanSpeed);
44 modelWorkspace.assignin('gradZone', simProp.gradZone);
45
46 % Specifying a Parameter Structure
47 ParamNameValStruct.StopTime = num2str(simProp.
    simulationStopTime);
48
49 % — SIMULATION —
50 simRes = sim(simProp.modelName, ParamNameValStruct);

```

51

52 **end**

Izvorna koda C.4: Osvežitev in priprava simulacijskih parametrov v delovnem prostoru MATLAB-a. Tukaj se izvede še dejanska simulacija.

Funkcija `plotResult.m` je namenjena pripravi okolja za potrebe vizualizacije rezultatov. Na začetku se sprva naredi zajem podatkov iz objekta, ki vsebuje rezultate simulacij. Nato se glede na simulacijsko obdobje pokliče za ta namen implementirano funkcijo.

```

1 function plotResult(simres)
2 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
3 % plotResult %
4 % INPUTS %
5 % simres — simulation result object %
6 % %
7 % DESCRIPTION %
8 % This function is responsible for plot several different %
9 % simulation scenarios. Various plot scenarios can be %
10 % plotted with choosing the appropriate function, %
11 % (see 'PLOTING FUNCTIONS ON CANVAS' below). %
12 % %
13 % author: Rok Prodan %
14 % date: 10.09.2014 %
15 % institution: Faculty of Computer and Information Science %
16 % university: University of Ljubljana %
17 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
18
19 % — INITIALIZE CANVAS —
20 close all; % deletes all previous figures
21 set(0, 'Units', 'pixels');
22 scnsz = get(0, 'ScreenSize');
23
24 % — DATA ACQUISITION —
25 % Indoor temperature
26 ts1 = simres.get('Tindoors');
27 ts1.TimeInfo.Units = 'hours';

```

```
28 |
29 | % Outdoor temperature
30 | ts2 = simres.get('Toutdoors');
31 | ts2.TimeInfo.Units = 'hours';
32 |
33 | % Comfort zone
34 | tsUpper = ts1;
35 | tsUpper.Data = 25;
36 | tsLower = ts1;
37 | tsLower.Data = 21;
38 |
39 | % Set point temperature – reference temperature
40 | ts3 = simres.get('setPointReference');
41 | ts3.TimeInfo.Units = 'hours';
42 |
43 | % Heat and cooled flow
44 | ts4 = simres.get('heatAirFlow');
45 | ts4.TimeInfo.Units = 'hours';
46 | ts5 = simres.get('coldAirFlow');
47 | ts5.TimeInfo.Units = 'hours';
48 |
49 | % — FIGURE POSITION —
50 | fig1 = figure('Name', 'Simulation Plot Window');
51 | position = get(fig1, 'Position'); % [left bottom width height]
52 | outerpos = get(fig1, 'OuterPosition');
53 | borders = outerpos - position;
54 | edge = -borders(1)/2;
55 | pos1 = [edge,...
56 |         scnsz(4)-outerpos(4)-edge,...
57 |         outerpos(3),...
58 |         outerpos(4)];
```

```
59 set(fig1, 'OuterPosition', pos1);
60
61 % — PLOTTING FUNCTIONS ON CANVAS —
62 % plotYear([ts1, ts2]);
63 % plotMonth([ts1, ts2]);
64 % plotWeek([ts1, ts2]);
65 % plotCooling([ts1, ts2]);
66 % plotHeating([ts1, ts2]);
67 plotScenario([ts1, ts2, tsUpper, tsLower]);
68
69 end
```

Izvorna koda C.5: Funkcija za izrisovanje grafov.